

# Materialwissenschaftliche und technologische Untersuchungen von Teigen aus Weizen- und Kichererbsenmehlmischungen

vorgelegt von  
Dipl.-Ing, Idriss Mohammed  
aus Aleppo, Syrien

von der Fakultät III – Prozesswissenschaften  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften  
-Dr.-Ing.-  
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. sc. techn. F. Thiemig

Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. B. Senge

Gutachter: Prof. Dr. Dr.- Ing. h.c. B. Handreck

Tag der Wissenschaftlichen Aussprache: 14.04.2011

**Berlin 2011**

**D83**

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich gern Herrn **Prof. Dr. sc. techn. B. Senge** meinen herzlichen Dank für die fachliche Betreuung, Förderung dieser Arbeit und freundliche Unterstützung aussprechen.

Mein besonderer Dank für die wertvollen wissenschaftlichen Ratschläge und Berufserfahrungen, die ich während meiner Zeit am Institut für Lebensmittelsrheologie erwerben konnte, sowie für die mir entgegengebrachte fachliche und menschliche Hilfe während der schriftlichen Ausarbeitung meiner Dissertation.

Herrn **Prof. Dr. Dr.-Ing. h.c. B. Handreck** danke ich für seine fachlichen Anregungen und die freundliche Übernahme des Korreferates.

Herrn **Prof. Dr. sc. techn. F. Thiemig** sei für Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission gedankt.

Herrn **Dr.-Ing. R. Blochwitz** danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der rheologischen Untersuchungen.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Fachgebiete Lebensmittelsrheologie und Lebensmittelfunktionalität der TU Berlin sei an dieser Stelle für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der praktischen Arbeiten gedankt.

Die syrische Regierung und die Aleppo Universität haben die finanzielle Basis für die Arbeit und das Leben während des Promotionsstudiums in Deutschland gelegt. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken.

Zuletzt danke ich meiner Frau und meinen Eltern, die mich während der Arbeit und bei schwierigen Situationen aufgebaut und moralisch unterstützt haben.

## **Materials science and technological studies of dough's from wheat- and chickpea flour blends**

### **Abstract**

The aim of this study is to investigate a new product, which to differ itself in their composition, flavor and structure from traditional bakery products on the market and simultaneously identify a balanced content of beneficial nutritional substances. It was attempted, to make a contribution to the clarification of the physical processes and structure formation process and structural change in the wheat dough before and after mixing with chickpea flour. The rheological and technological properties of dough are studied at three different mixing ratios of chickpea flour to wheat flour (10:90, 20:80, 30:70) and further for three different fractions of chickpea flour with different particle size. A content analysis of the used flour components confirmed the different composition of wheat- and chickpea flour. The conventional rheological studies of dough at Example Farinograph and Extensograph show clear differences between wheat flour, chickpea flour and their blends. With increasing concentration of chickpeas decrease the viscoelastic relation and therefore the processing performance. The rheological investigations carried out by means UDS 200 (Paar-Physica) with a plate-plate system Modern Oscillation is served to determine the native state structure of the dough in the micro-level. To be used the storage module ( $G'$ ), loss module ( $G''$ ) and damping factor ( $\tan \delta$ ) in the experimental positions; amplitude- and frequency sweep, temperature sweep and creep test. The dough demonstrated a deformation-dependent behavior and a distinctive linear viscoelastic behavior in the region of  $10^{-4} \leq \gamma \leq 10^{-3}$ . The curves of storage modulus  $G'$  and loss modulus  $G''$  run nearly parallel in frequency sweep and  $G'$  was much greater than  $G''$ .

This indicates the distinctive solid state characteristics of all dough's and demonstrated that dough promoted dispersion and not gel-like structure. The level of  $G'$  and  $G''$  increase with increasing the chickpea Proportion. Using the temperature sweeps can be simulated the baking properties of dough. By the temperature increase from 20 to 90 °C can be detected the changes of material and process as denaturizing of proteins, pre- and gelatinization of starch granules and the mobilization of water.

It was demonstrated that the dough have the best structural stability and homogeneity and processing ability in the optimum range of temperatures, salt concentration and the water. A sensory acceptability of the bakery products is saved up to 20 % concentration of chickpeas. Even though deterioration in the structural formation and a weakening of the gluten formation in the dough system after the addition of chickpea flour were detected that the blends have relatively good viscoelastic behavior (viscoelastic properties will be maintained by the dominance of wheat) to bake acceptable and consumable bread. Finally, the baking performance of genetic modified maize sample is evaluated by rheological methods. These investigation provide inference about optimization strategies for research.

## **Materialwissenschaftliche und technologische Untersuchungen von Teigen aus Weizen- und Kichererbsenmehlmischungen**

### **Abstrakt**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, neue Produkt zu untersuchen, die sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, ihres Geschmacks sowie ihrer Struktur von herkömmlichen auf dem Markt befindlichen Backerzeugnissen unterscheiden und gleichzeitig einen ausgewogenen Gehalt an ernährungsphysiologisch günstigen Inhaltsstoffen aufweisen. Arbeitsgegenstand ist die Aufklärung der physikalischen Vorgänge und Strukturbildungsprozesse sowie Strukturänderungen des Weizenteigs vor und nach der Zumischung von Kichererbsenmehl. Die rheologischen und technologischen Eigenschaften des Teiges werden bei drei unterschiedlichen Mischverhältnissen Kichererbsen- zu Weizenmehl (10:90, 20:80, 30:70) sowie weiter differenziert für drei verschiedene Fraktionen des Kichererbsenmehles mit unterschiedlicher Partikelgröße untersucht. Eine Inhaltsstoffanalyse der eingesetzten Mehlkomponenten bestätigt die unterschiedliche Zusammensetzung von Weizen- und Kichererbsenmehl. Die konventionellen teigrheologischen Untersuchungen am Beispiel von Farinograph- und Extensographuntersuchungen weisen eindeutige Unterschiede zwischen Weizen- und Kichererbsenmehl sowie deren Mischungen auf. Generell sinkt mit zunehmender Kichererbsenkonzentration die viskoelastische Relation und damit das Verarbeitungsverhalten. Mittels Micro Visko-Amylo-Graph wird eine Zunahme der Verkleisterungstemperatur und der Verkleisterungszeit der Mehlmischungen ermittelt. Moderne Oszillationsmessungen dienen der Ermittlung des nativen Strukturierungszustandes der Teige in der Mikroebene. Genutzt werden die dynamischen Moduli: Speichermodul  $G'$ , Verlustmodul  $G''$  und Verlustfaktor  $\tan \delta$  in den Versuchsanstellungen Amplituden- und Frequenzsweep sowie Temperatursweep und Kriechversuch. Die Untersuchungen erfolgen mittels Luftlagerreometer mit einem Platte-Platte-System. Die Teige weisen ein deformationsabhängiges Verhalten und ein ausgeprägtes linear-viskoelastisches Verhalten im Bereich  $10^{-4} \leq \gamma \leq 10^{-3}$  mit dominantem Festkörperverhalten auf. Die dynamische Moduli verlaufen nahezu parallel mit Anstieg in der Frequenzsweeps-messung. Damit wird die Dispersionsstruktur des Teigs nachgewiesen. Die Levels von Speichermodul und Verlustmodul erhöhen sich mit zunehmendem Kichererbsenanteil. Mit Hilfe des Temperatursweeps wird das Backverhalten von Teigen simuliert. Bei der Erwärmung von 20 auf 90 °C werden ablaufende stoffliche Veränderungen am Beispiel Proteindenaturierung, Stärkeverkleisterung sowie die Mobilisierung des Wassers detektiert. Es wurde nachgewiesen, dass die Teige im optimalen Bereich der Temperaturen, der Salzkonzentration sowie der Schüttwassermenge die beste Strukturstabilität und Homogenität bzw. Verarbeitungsfähigkeit aufweisen. Bei dem Backversuch wurde eine sensorische Akzeptanz der Backwaren bis zu einer Kichererbsenkonzentration von 20 % gesichert. Das Backverhalten einer gentechnisch veränderten Maisproben wird mit rheologischen Methoden bewertet und damit lassen Rückschlüsse auf optimierungsstrategischer Forschung zu.



<b>1.</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Aufgabenstellung und Zielsetzung .....</b>	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>Literaturrecherche .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1.</b>	<b>Aufbau und Qualität von Kichererbsen.....</b>	<b>4</b>
3.1.1.	Der Kichererbsenmarkt weltweit und in Syrien.....	4
3.1.2.	Ernährungsphysiologische Eigenschaften von Leguminosen.....	4
3.1.3.	Morphologie und chemische Zusammensetzungen der Kichererbsen.....	6
3.1.3.1.	Kichererbsenproteine und deren funktionelle Eigenschaften.....	7
3.1.3.2.	Kohlenhydrate der Kichererbsen.....	8
3.1.3.3.	Lipide der Kichererbsen.....	9
<b>3.2.</b>	<b>Aufbau und Qualität von Weizen.....</b>	<b>9</b>
3.2.1.	Der Weizenmarkt weltweit und in Syrien.....	9
3.2.2.	Morphologie und chemische Zusammensetzung von Weizen.....	9
3.2.2.1.	Weizenproteine und deren funktionelle Eigenschaften.....	10
3.2.2.2.	Kohlenhydrate des Weizens.....	13
3.2.2.3.	Lipide des Weizens.....	14
<b>3.3.</b>	<b>Stand des Wissens zur Zerkleinerung und Sieben von Getreide .....</b>	<b>15</b>
3.3.1.	Wirkprinzip der Hammermühle.....	15
3.3.2.	Partikelgrößenverteilung.....	16
<b>3.4.</b>	<b>Mehl- und Teig rheologie.....</b>	<b>16</b>
3.4.1.	Theorie der Teigbereitung.....	16
3.4.2.	Teigstruktur und Teigentwicklung.....	16
3.4.3.	Teigphysikalische Eigenschaften.....	19
3.4.3.1.	Knetversuche – Farinograph.....	19
3.4.3.2.	Dehnungsmessungen – Extensograph.....	21
3.4.3.3.	Verkleisterungseigenschaften und Viskositätsverhalten.....	22
<b>3.5.</b>	<b>Dynamische Teig rheologie.....</b>	<b>23</b>
3.5.1.	Rheologische Grundlagen.....	23
3.5.2.	Rheologische Meßsysteme für Teige.....	24
3.5.3.	Oszillationstest.....	25

3.5.3.1.	Auswertungsmethoden.....	27
3.5.4.	Kriech- und Kriecherholungsversuche.....	28
<b>3.6.</b>	<b>Schlussfolgerungen aus der Literaturrecherche.....</b>	<b>30</b>
<b>4.</b>	<b>Material und Methoden.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1.</b>	<b>Versuchsmaterialien.....</b>	<b>31</b>
4.1.1.	Bestimmung des Hektolitergewichts.....	31
4.1.2.	Bestimmung der Tausendkornmasse.....	31
<b>4.2.</b>	<b>Technischer Versuchsablauf (Prozessführung) .....</b>	<b>31</b>
4.2.1.	Benetzung.....	31
4.2.2.	Mahlen.....	32
4.2.3.	Partikelgrößenbestimmung mittels Laserpartikelanalytik.....	32
<b>4.3.</b>	<b>Analytische Methoden.....</b>	<b>32</b>
4.3.1.	Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes.....	32
4.3.2.	Bestimmung des Mineralstoffgehaltes.....	33
4.3.3.	Bestimmung des Stärkegehaltes.....	33
4.3.4.	Bestimmung des Rohproteingehaltes.....	33
4.3.5.	Bestimmung des Rohfettgehaltes.....	33
<b>4.4.</b>	<b>Rheologische Untersuchungen.....</b>	<b>33</b>
4.4.1.	Farinograph.....	33
4.4.2.	Extensograph.....	34
4.4.3.	Micro Visco-Amylo-Graph.....	34
<b>4.5.</b>	<b>Fundamentale rheologische Untersuchungen.....</b>	<b>35</b>
4.5.1.	Oszillationsmessungen.....	35
4.5.1.1.	Amplitudensweep.....	35
4.5.1.2.	Frequenzsweep.....	35
4.5.1.3.	Temperatursweep.....	36
4.5.1.4.	Timesweep.....	36
<b>4.6.</b>	<b>Kriechversuche.....</b>	<b>36</b>
<b>4.7.</b>	<b>Backversuch.....</b>	<b>36</b>

4.7.1.	Bestimmung des Gebäckvolumens.....	37
4.7.2.	Bestimmung der Backeigenschaften.....	38
<b>4.8.</b>	<b>Statistische Auswertung / Reproduzierbarkeit.....</b>	<b>38</b>
<b>5.</b>	<b>Inhaltsstoffe und Korngrößenverteilung der Ingredienzien.....</b>	<b>39</b>
<b>5.1.</b>	<b>Mehlinhaltsstoffe .....</b>	<b>39</b>
<b>5.2.</b>	<b>Zerkleinerung / Laserpartikelanalytik.....</b>	<b>39</b>
5.2.1.	Einzelhäufigkeitsverteilung.....	40
5.2.2.	Summenhäufigkeitsverteilung.....	41
<b>5.3.</b>	<b>Kapitelzusammenfassung.....</b>	<b>42</b>
<b>6.</b>	<b>Teigphysikalische Untersuchungen.....</b>	<b>43</b>
<b>6.1.</b>	<b>Farinograph Untersuchungen.....</b>	<b>43</b>
6.1.1.	Weizenmehlteig (Gesamtfraktion).....	43
6.1.2.	Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktion).....	43
6.1.3.	Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl).....	44
6.1.4.	Kichererbsenfraktion F1 ( $\leq 160 \mu\text{m}$ ).....	46
6.1.5.	Kichererbsenfraktion F2 ( $160 \mu\text{m} \leq F2 \leq 400 \mu\text{m}$ ).....	47
6.1.6.	Kichererbsenfraktion F3 ( $\geq 400 \mu\text{m}$ ).....	48
<b>6.2.</b>	<b>Extensograph Untersuchungen.....</b>	<b>49</b>
6.2.1.	Weizenmehlteig (Gesamtfraktion).....	49
6.2.2.	Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktion).....	50
6.2.3.	Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl).....	51
6.2.4.	Mischungen der Kichererbsenfraktion F1, F2 und F3.....	52
<b>6.3.</b>	<b>Micro Visco-Amylo-Graph Untersuchungen.....</b>	<b>53</b>
6.3.1.	Vergleich von Weizen- und Kichererbsenmehl (Gesamtfraktion).....	53
6.3.2.	Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl).....	55
6.3.3.	Kichererbsenfraktion F1.....	56
6.3.4.	Kichererbsenfraktion F2.....	57
6.3.5.	Kichererbsenfraktion F3.....	58
6.3.6.	Vergleich der reinen Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3.....	59
<b>6.4.</b>	<b>Kapitelzusammenfassung.....</b>	<b>60</b>

<b>7.</b>	<b>Fundamentale rheologische Untersuchungen.....</b>	<b>61</b>
<b>7.1.</b>	<b>Oszillationsmessungen.....</b>	<b>61</b>
7.1.1.	Amplitudensweepmessungen.....	61
7.1.1.1.	Weizen- und Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktion).....	61
7.1.1.2.	Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl).....	62
7.1.1.3.	Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3.....	63
7.1.2.	Frequenzsweepmessungen.....	66
7.1.2.1.	Vergleich Weizen- und Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktion).....	66
7.1.2.2.	Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl).....	68
7.1.2.3.	Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3.....	70
7.1.3.	Temperatursweepmessungen.....	73
7.1.3.1.	Weizen- und Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktion).....	73
7.1.3.2.	Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl).....	77
7.1.3.3.	Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3.....	79
<b>7.2.</b>	<b>Kriechversuch.....</b>	<b>85</b>
7.2.1.	Vergleich Weizen- und Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktion).....	85
7.2.2.	Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl).....	85
7.2.3.	Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3.....	87
<b>7.3.</b>	<b>Ermittlung der Einflussparameter auf Verarbeitungsverhalten von Teigen.....</b>	<b>91</b>
7.3.1.	Einfluss der Temperatur.....	91
7.3.1.1.	Amplitudensweepmessungen.....	91
7.3.1.2.	Frequenzsweepmessungen.....	93
7.3.2.	Einfluss der Schüttwassermenge.....	95
7.3.2.1.	Amplitudensweepmessungen.....	95
7.3.2.2.	Frequenzsweepmessungen.....	97
7.3.3.	Einfluss der Salzkonzentration.....	99
7.3.3.1.	Amplitudensweepmessungen.....	99
7.3.3.2.	Frequenzsweepmessungen.....	101
<b>7.4.</b>	<b>Backeigenschaften.....</b>	<b>103</b>
7.4.1.	Backergebnisse der Versuchsmehle.....	103

<b>7.5.</b>	<b>Kapitelzusammenfassung.....</b>	<b>109</b>
<b>8.</b>	<b>Teigrheologische Eigenschaften vom Maismehlen.....</b>	<b>110</b>
<b>8.1.</b>	<b>Farinographuntersuchung.....</b>	<b>110</b>
<b>8.2.</b>	<b>Oszillationsmessungen.....</b>	<b>113</b>
8.2.1.	Amplitudensweepmessungen.....	113
8.2.2.	Frequenzsweepmessungen.....	115
8.2.3.	Temperatursweepmessungen.....	117
8.2.4.	Timesweepmessungen.....	119
<b>8.3.</b>	<b>Kriechversuch.....</b>	<b>122</b>
<b>8.4.</b>	<b>Kapitelzusammenfassung.....</b>	<b>123</b>
<b>9.</b>	<b>Hinweise für weiterführende Untersuchungen.....</b>	<b>124</b>
<b>10.</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>125</b>
<b>11.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>128</b>
<b>12.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>139</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Die Verteilung der Kichererbsenproduktion auf der Welt.....	4
Abb. 3.2: Kichererbsen (Pflanze, Korn).....	7
Abb. 3.3: Mikroskopische Aufnahme der Stärke.....	8
Abb. 3.4: Die Verteilung der Weizenproduktion auf der Welt.....	9
Abb. 3.5: Aufbau des Weizenkorns.....	10
Abb. 3.6: Mikroskopische Aufnahme von Weizenkorn.....	10
Abb. 3.7: Komponenten der Weizenproteine.....	11
Abb. 3.8: Mikroskopische Aufnahme der Weizenstärke.....	13
Abb. 3.9: Wirkprinzip der Hammermühle.....	15
Abb. 3.10: Vorgänge bei der Kleberbildung.....	17
Abb. 3.11: Farinogrammkurve.....	20
Abb. 3.12: Extensographkurve.....	21
Abb. 3.13: Verkleisterungsprozess der Stärkekörner.....	23
Abb. 3.14: Platte-Platte-Meßsystem (schematische Darstellung).....	24
Abb. 3.15: Sinusförmige Deformationsvorgabe mit dynamischer Beanspruchung.....	26
Abb. 3.16: AS-Messung Typische Verläufe von Speicher- und Verlustmodul.....	27
Abb. 3.17: Auswertung mittels Regressionsgleichungen.....	27
Abb. 3.18: Kriechversuch.....	28
Abb. 4.1: Partikelgrößenanalysator HORIBA LA-950 von Retsch.....	32
Abb. 4.2: Brabender Farinograph.....	33
Abb. 4.3: Brabender Extensograph.....	34
Abb. 4.4: Brabender Micro Visco-Amylo-Graph.....	34
Abb. 4.5: Labormessgerät UDS 200.....	35
Abb. 5.1: Einzelhäufigkeitsverteilung der Mehle.....	40
Abb. 5.2: Spezifische Oberfläche und mittlere Teilchengröße der Mehle.....	41
Abb. 5.3: Summenverteilung der Mehle.....	41
Abb. 6.1: Farinogramme des Weizenteigs.....	43
Abb. 6.2: Farinogramme des Kichererbsenteigs.....	44
Abb. 6.3: Farinogramme der Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl).....	45
Abb. 6.4: Farinogramme der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F1).....	46
Abb. 6.5: Farinogramme der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F2).....	47
Abb. 6.6: Farinogramme der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F3).....	48
Abb. 6.7: Beispielhafter Vergleich Extensogrammen des WM-Teigs nach 45, 90 und 135 min.....	50

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 6.8: Beispielhafter Vergleich zwischen Viscogramm mit WM- und mit KE-Mehl.....	53
Abb. 6.9: Viscogrammskurve der reinen KE-Fraktion F1.....	56
Abb. 6.10: Viscogrammskurve der reinen KE-Fraktion F2.....	57
Abb. 6.11: Viscogrammskurve der reinen KE-Fraktion F3.....	58
Abb. 7.1: Amplitudensweep Vergleich Weizen- und Kichererbsenteig.....	61
Abb. 7.2: Amplitudensweep der Mehlmischungen (10 %, 20 % und 30 % KE).....	62
Abb. 7.3: Amplitudensweep der Fraktionsmischungen (10 %, 20 % und 30 % F1).....	63
Abb. 7.4: Amplitudensweep der Fraktionsmischungen (10 %, 20 % und 30 % F2).....	64
Abb. 7.5: Amplitudensweep der Fraktionsmischungen (10 %, 20 % und 30 % F3).....	65
Abb. 7.6: Frequenzsweep Vergleich Weizen- und Kichererbsenteig.....	67
Abb. 7.7: Frequenzsweep der Mehlmischungen (10 %, 20 % und 30 % KE).....	68
Abb. 7.8: Frequenzsweep der Fraktionsmischungen (10 %, 20 % und 30 % F1).....	70
Abb. 7.9: Frequenzsweep der Fraktionsmischungen (10 %, 20 % und 30 % F2).....	71
Abb. 7.10: Frequenzsweep der Fraktionsmischungen (10 %, 20 % und 30 % F3).....	72
Abb. 7.11: Weizenteig Simulation der Backeigenschaften.....	74
Abb. 7.12: Kichererbsenteig Simulation der Backeigenschaften.....	75
Abb. 7.13: Temperatursweep Vergleich WM-Teig mit KE-Teig.....	77
Abb. 7.14: Temperatursweep Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mischungen.....	78
Abb. 7.15: Temperatursweep der F1 im Vergleich zum WM-Teig.....	80
Abb. 7.16: Temperatursweep der F2 im Vergleich zum WM-Teig.....	81
Abb. 7.17: Temperatursweep der F3 im Vergleich zum WM-Teig.....	82
Abb. 7.18: Vergleich WM-Teig mit KE-Teig sowie mit KE-Fraktionen.....	83
Abb. 7.19: Kriechversuch Vergleich WM- und KE-Teig.....	85
Abb. 7.20: Kriechversuch der Mehlmischungen im Vergleich zum WM- und KE-Teig.....	86
Abb. 7.21: Kriechversuch der Fraktionsmischungen F1 im Vergleich zum WM-Teig.....	87
Abb. 7.22: Kriechversuch der Fraktionsmischungen F2 im Vergleich zum WM-Teig.....	88
Abb. 7.23: Kriechversuch der Fraktionsmischungen F3 im Vergleich zum WM-Teig.....	89
Abb. 7.24: Kriechversuch der Fraktionen F1, F2 und F3 im Vergleich zum WM- und KE-Teig.....	90
Abb. 7.25: Amplitudensweep Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Messtemperaturen.....	91
Abb. 7.26: Amplitudensweep Vergleich der Mehlmischungen bei unterschiedlichen Messtemperaturen.....	92
Abb. 7.27: Frequenzsweep Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Messtemperaturen.....	93
Abb. 7.28: Frequenzsweep Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Messtemperaturen.....	94
Abb. 7.29: Amplitudensweep Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Wasseranteilen.....	96
Abb. 7.30: Amplitudensweep Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Wasseranteilen.....	96
Abb. 7.31: Frequenzsweep Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Wasseranteilen.....	97
Abb. 7.32: Frequenzsweep Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Wasseranteilen.....	98

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 7.33: Amplitudensweep Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen.....	99
Abb. 7.34: Amplitudensweep Vergleich der Mischungen bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen.....	100
Abb. 7.35: Frequenzsweep Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen.....	101
Abb. 7.36: Frequenzsweep Vergleich der Mischungen bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen.....	102
Abb. 7.37: Teigeigenschaften Vergleich WM-Teig und deren Mischungen mit KE-Mehl.....	104
Abb. 7.38: Vergleich der Backeigenschaften WM-Mehl und Mischungen mit KE-Mehl.....	105
Abb. 7.39: Teigeigenschaften Vergleich WM-Teig und deren Mischungen mit Fraktion F1.....	106
Abb. 7.40: Vergleich der Backeigenschaften WM und Mischungen mit Fraktion F1.....	106
Abb. 7.41: Teigeigenschaften Vergleich WM-Teig und deren Mischungen mit Fraktion F2.....	108
Abb. 7.42: Vergleich der Backeigenschaften WM-Mehl und Mischungen mit Fraktion F2.....	108
Abb. 7.43: Teigeigenschaften Vergleich WM-Teig und deren Mischungen mit Fraktion F3.....	108
Abb. 7.44: Vergleich der Backeigenschaften WM-Mehl und Mischungen mit Fraktion F3.....	108
Abb. 8.1: Farinographuntersuchung Maismehl-Standard.....	110
Abb. 8.2: Farinographuntersuchung Probe A188 x H99.....	111
Abb. 8.3: Farinographuntersuchung Maismehl Probe B x A.....	111
Abb. 8.4: Farinographuntersuchung Maismehl Probe AD X B.....	111
Abb. 8.5: Farinographuntersuchung Maismehl Probe EAD 50-5.....	112
Abb. 8.6: Farinographuntersuchung Maismehl Probe C x A.....	112
Abb. 8.7: Farinographuntersuchung Weizenmehl Type 405.....	112
Abb. 8.8: Amplitudensweep Vergleich sämtlicher Präparate mit WM- und Mais-Standard.....	113
Abb. 8.9: Frequenzsweep Vergleich der Mais-Präparate mit WM- und Mais-Standard.....	115
Abb. 8.10: Mais-Standard Simulation der Backeigenschaften.....	117
Abb. 8.11: Simulation der Backeigenschaften Maispräparationen im Vergleich zum Mais und WM-Teig...	118
Abb. 8.12: Timesweep Vergleich Weizen und Mais-Standard.....	120
Abb. 8.13: Timesweep Vergleich der Mais-Standard und Maispräparation A188 x H 99.....	120
Abb. 8.14: Timesweep Vergleich der Maispräparation B x A mit WM- und Mais-Standard.....	121
Abb. 8.15: Timesweep Vergleich der Maispräparation mit WM- und Mais-Standard.....	121
Abb. 8.16: Kriechversuch Vergleich sämtlicher Mais-Präparate mit WM- und Mais-Standard.....	122



## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1:	Kichererbsenproduktion in Syrien Import und Export-Zahlen.....	4
Tab. 3.2:	Aminosäurezusammensetzung in Kichererbsen und Weizen in % von Protein.....	5
Tab. 3.3:	Chemische Zusammensetzung der Kichererbsen (Angaben in % TS).....	7
Tab. 3.4:	Anteil der Proteinfractionen im vollständigen Samen und Keimblatt der Kichererbsen.....	8
Tab. 3.5:	Weizenproduktion in Syrien Import und Export-Zahlen.....	9
Tab. 3.6:	Zusammensetzung des Weizenkorns in % TS.....	10
Tab. 3.7:	Anteile und Löslichkeit der Weizenproteine in %.....	11
Tab. 3.8:	Verteilung der Ballaststoffe beim Weizen in %.....	14
Tab. 4.1:	Sensorische Beurteilungskriterien des Gebäcks.....	38
Tab. 5.1:	Inhaltsstoffzusammensetzung des WM- und KE-Mehls, sowie der KE-Fractionen.....	39
Tab. 5.2:	Ergebnisse der Laserpartikelanalytik.....	40
Tab. 6.1:	Farinogrammdaten des Weizenteigs.....	43
Tab. 6.2:	Farinogrammdaten des Kichererbsenteigs.....	44
Tab. 6.3:	Farinogrammdaten der Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl).....	45
Tab. 6.4:	Farinogrammdaten der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F1).....	47
Tab. 6.5:	Farinogrammdaten der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F2).....	48
Tab. 6.6:	Farinogrammdaten der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F3).....	49
Tab. 6.7:	Extensogrammwerte des WM-Mehls nach 45, 90 und 135 min Ruhezeit.....	50
Tab. 6.8:	Extensogrammwerte der Mehlmischungen im Vergleich zum WM-Teig.....	51
Tab. 6.9:	Extensogrammwerte der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F1).....	52
Tab. 6.10:	Extensogrammwerte der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F2).....	52
Tab. 6.11:	Extensogrammwerte der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F3).....	52
Tab. 6.12:	Stärkeeigenschaften des Weizen- und Kichererbsenmehls.....	54
Tab. 6.13:	Stärkeeigenschaften der Mehlmischungen im Vergleich mit WM- und KE-Mehl.....	55
Tab. 6.14:	Stärkeeigenschaften der Kichererbsenfraktion F1.....	56
Tab. 6.15:	Stärkeeigenschaften der Kichererbsenfraktion F2.....	57
Tab. 6.16:	Stärkeeigenschaften der Kichererbsenfraktion F3.....	58
Tab. 6.17:	Stärkeeigenschaften der reinen Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3.....	59
Tab. 7.1:	AS-Messung Vergleich Weizen- und Kichererbsenteig .....	62
Tab. 7.2:	AS-Messung Mehlmischungen im Vergleich zum WM-Teig.....	63
Tab. 7.3:	AS-Messung Fraktionen F1 im Vergleich zum WM-Teig .....	64
Tab. 7.4:	AS-Messung Fraktionen F2 im Vergleich zum WM-Teig .....	65

## Tabellenverzeichnis

---

Tab. 7.5: AS-Messung Fraktionen F3 im Vergleich zum WM-Teig .....	66
Tab. 7.6: FS-Messung Vergleich WM- und Kichererbsenteig.....	68
Tab. 7.7: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mischungen.....	69
Tab. 7.8: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Fraktionsmischungen F1.....	70
Tab. 7.9: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Fraktionsmischungen F2.....	72
Tab. 7.10: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Fraktionsmischungen F3.....	73
Tab. 7.11: Temperatursweep charakteristische Werte von WM-Teig.....	75
Tab. 7.12: Temperatursweep charakteristische Werte von KE-Teig.....	76
Tab. 7.13: Temperatursweep Vergleich WM-Teig und Mehlmischungen mit KE-Mehl.....	79
Tab. 7.1: Temperatursweep Fraktionsmischungen F1.....	80
Tab. 7.2: Temperatursweep Fraktionsmischungen F2.....	82
Tab. 7.3: Temperatursweep Fraktionsmischungen F3.....	83
Tab. 7.4: Temperatursweep Vergleich WM- und KE-Teig sowie reine KE-Fraktionen (F1, F2 und F3).....	84
Tab. 7.5: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig.....	85
Tab. 7.6: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mehlmischungen mit KE.....	86
Tab. 7.7: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mehlmischungen mit F1.....	87
Tab. 7.8: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mehlmischungen mit F2.....	88
Tab. 7.9: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mehlmischungen mit F3.....	89
Tab. 7.10: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig sowie KE-Fraktionen F1, F2 und F3.....	90
Tab. 7.24: AS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Temperaturen.....	92
Tab. 7.25: AS-Messung Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Temperaturen.....	93
Tab. 7.26: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Temperaturen.....	94
Tab. 7.27: FS-Messung Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Temperaturen.....	95
Tab. 7.28: AS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Wasseranteilen.....	96
Tab. 7.29: AS-Messung Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Wasseranteilen.....	97
Tab. 7.30: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Wasseranteilen.....	98
Tab. 7.31: FS-Messung Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Wasseranteilen.....	99
Tab. 7.32: AS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen.....	100
Tab. 7.33: AS-Messung Vergleich der Mischungen bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen.....	101
Tab. 7.34: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen.....	102
Tab. 7.35: FS-Messung Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen.....	103
Tab. 7.36: Backergebnisse WM-Teig und deren Mischungen mit KE-Mehl.....	104
Tab. 7.37: Backergebnisse Beurteilungskriterien WM-Teig und deren Mischungen mit KE-Mehl.....	106
Tab. 7.38: Backergebnisse WM-Teig und deren Mischungen mit KE-Fraktionen.....	107
Tab. 8.1: Amplitudensweep Vergleich sämtlicher Präparate mit WM- und Mais-Standard.....	115

## Tabellenverzeichnis

---

Tab. 8.2: Frequenzsweep Vergleich der Teigpräparationen sowie WM- und Mais-Standard.....	116
Tab. 8.3: Temperatursweep Vergleich der Teigpräparationen sowie WM- und Mais-Standard.....	119
Tab. 8.4: Kriechversuchsdaten Vergleich der Präparation sowie der WM-und Mais-Standard.....	122

## Verzeichnis der Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m <sup>2</sup>
DB	Dehnbarkeit als Extensographmessgröße	mm, m
DE	Dehnungsenergie als Extensographmessgröße	cm <sup>2</sup> , m <sup>2</sup>
DW	Dehnwiderstand als Extensographmessgröße	EE
d <sub>10</sub>	Durchgang von 10 % des Partikelspektrums	m
d <sub>50</sub>	Durchgang von 50 % des Partikelspektrums, Median	m
d <sub>90</sub>	Durchgang von 90 % des Partikelspektrums	m
EE	Extensogramm-Einheit	EE
F	Kraft	N
FA	Feuchteanteil	kg/kg
FA1	Feuchtegehalt vor dem Netzen	kg/kg
FA2	Feuchtegehalt nach dem Netzen	kg/kg
FE	Farinograph-Einheit	FE
f	Frequenz	Hz
G	Gleitmodul	Pa
G'	Speichermodul	Pa
G''	Verlustmodul	Pa
G*	komplexer Schubmodul	Pa
G <sub>0</sub>	Schubmodul	Pa
h	Plattenabstand	m
J <sub>e</sub>	Gleichgewichtskriechkomplianz	Pa <sup>-1</sup>
J <sub>m</sub>	Viskoelastische Komplianz	Pa <sup>-1</sup>
M	Drehmoment	Nm
MG	Molekulargewicht	kg/kmol, Da
m <sub>W</sub>	Wassermenge	kg
m <sub>KE</sub>	Kichererbsenmenge	kg
O	spezifische Oberfläche	cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup>
R	Plattenradius	m
Q(r)	Summenhäufigkeit	%
q	Einzelhäufigkeit	%
SK	Salzkonzentration	kg/kg
T	Temperatur	°C
TA	Teigausbeute	%
TER	Teigerweichung Farinogrammmessgröße	FE
TEZ	Teigentwicklungszeit	s, min
TK	Teigkonsistenz Farinogrammmessgröße	FE
TKM	Tausendkornmasse	kg
TS	Trockensubstanz	%

## Verzeichnis der verwendeten Symbole und Formelzeichen

TST	Teigstabilität	min
t	Zeit	s, min, h
VZ	Verhältniszahl	-
v	Umfangsgeschwindigkeit	m/s
$\bar{x}$	Mittelwert	
x	Exponent der potenziellen Regressionsgleichung von $G'$	$G'(f) = G'_{1\text{Hz}} \cdot f^x$
y	Exponent der potenziellen Regressionsgleichung von $G''$	$G''(f) = G''_{1\text{Hz}} \cdot f^y$

## Verzeichnis der griechischen Symbole

Formelzeichen	Parameter	Einheit
$\gamma$	Deformation	-
$\dot{\gamma}$	Scherrate / Schergeschwindigkeit	$\text{s}^{-1}$
$\dot{\gamma}_3$	Newtonviskositätsanteil im Kriechversuch	$\text{s}^{-1}$
$\gamma_e$	elastische Rückstellung	-
$\gamma_{\text{max}}$	maximale Deformation	-
$\gamma_{\text{krit}}$	kritische Deformation	-
$\gamma_v$	Viskose Rückstellung	-
$\gamma_z$	Zerstörungsdeformation	-
$\delta$	Phasenverschiebungswinkel	°
$\tan \delta$	Verlustfaktor	-
$\eta$	Viskosität	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\eta_0$	Nullviskosität, Ruhescherviskosität	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\eta'$	Realteil Viskosität	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\eta''$	Imaginäre Viskosität	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$ \eta^* $	Komplexe Viskosität	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\lambda$	Relaxationszeit	s
$\tau$	Schubspannung	Pa
$\dot{\tau}$	Spannungsgeschwindigkeit	Pa/s
$\tau_0$	Fließgrenze	Pa
$\varphi$	relative Feuchte	%
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit, Kreisfrequenz	$\text{s}^{-1}$

## Verzeichnis der Abkürzungen

Index / Abkürzungen	Erläuterung
AS	Amplitudensweep
AOAD	Arab Organization of Agriculture Development
BE	Brabender-Einheit
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
F1	Kichererbsenfraktion ( $\leq 160 \mu\text{m}$ )
F2	Kichererbsenfraktion ( $160 \mu\text{m} \leq F2 \leq 400 \mu\text{m}$ )
F3	Kichererbsenfraktion ( $\geq 400 \mu\text{m}$ )
FAO	Food and Agriculture Organization
FS	Frequenzsweep
GVO	Gentechnisch veränderte Organismen
ICC	International Association for Cereal Chemistry and Technology
ISO	International Standard Organization-Norm
KE	Kichererbsen
LVB	linear-viskoelastische Bereich
MVAG	Micro Visco-Amylo-Graph
PCM	Protein-calorie malnutrition
pot	Potenzielle Regressionsgleichung
RMT	Rapid-Mix Test
SDS	Sodium Dodecyl Sulphate
SAS	Statistical Analysis System
TMS	Temperatursweep
WHO	World Health Organization
WM	Weizen

## 1. Einleitung

Die Ernährungssituation ist in den meisten Entwicklungsländern trotz vielerlei Bemühungen noch immer als kritisch zu bezeichnen. Protein-Kalorien-Unterernährung (PCM) ist ein Haupternährungssyndrom in entwickelten afro-asiatischen Ländern. Es betrifft mehr als 170 Million Vorschulkinder und stillende Mütter. Mit dem steigenden Trend im Bevölkerungswachstum wird sich auch der Proteinmangel in Zukunft weiter verschärfen, wenn nicht durch Maßnahmen der Lebensmitteltechnologie Verbesserungen sowie Lösungen geschaffen werden. Der Einsatz von Kichererbsen als Proteinquelle kann eine Alternative zum bestehenden Zustand sein, wenn die Applikationseigenschaften in Mehlmischungen durch lebensmittelmateriawissenschaftliche Forschungen verbessert bzw. optimiert werden. Diese genügsame Hülsenfrucht, die bei einem Minimum an Ressourcen ein Maximum an proteinreicher Nahrung hervorbringt, stellt ein wichtiges Nahrungsmittel der ärmeren Bevölkerungsschichten der Welt dar. Kichererbsen sind anspruchslos im Anbau, halten Hitze und Trockenheit gut aus und sind traditionell, kostengünstig und sättigend. Obschon auch in Mitteleuropa seit Jahrhunderten bekannt, kommt die Kichererbsen nur selten auf den Tisch. Im Orient, in weiten Teilen Afrikas, auf dem indischen Subkontinent und in Mexiko hingegen ist die schrumpelige Hülsenfrucht ein Grundnahrungsmittel. Sie trägt wesentlich zur Proteinversorgung der Bevölkerung bei. Eine Beschaffung ausreichender tierischer Proteinmenge ist vergleichsweise schwieriger und aufwendiger [1]. Eine alternative Lösung für die Verbesserung des Ernährungsstatus der Bevölkerung ist durch Ergänzung der Ernährungsgewohnheiten mit pflanzlichen Proteinen möglich, beispielsweise durch die Anwendung von Mischmehlen, in denen Weizen ganz oder teilweise ersetzt ist. Dazu kommen alle stärkereichen Rohstoffe wie Mais und Reis und als Proteinträger vor allem Leguminosen (Linsen, Bohnen, Erbsen, Kichererbsen und Sojabohnen) in Betracht. Mischmehle können zur Herstellung von Broten und Teigwaren verwendet werden, so dass sich aufgrund des verringerten Weizenmehlanteils in den Endprodukten eine Begrenzung oder gar Absenkung des Weizenverbrauchs und damit entsprechender Importe ergeben kann, sofern die Leguminosen im eigenen Land erzeugt werden können. Der hohe Proteingehalt ist einer der wesentlichen Pluspunkte der Hülsenfrüchte. Die Leguminosen zeichnen sich durch einen hohen ernährungsphysiologischen Wert infolge ihres proteinreichen Inhalts an wertvollen essentiellen Aminosäuren, Vitaminen und Spurenelementen aus [2, 3]. Kichererbsen schneiden in dieser Beziehung zwar schlechter ab als etwa Sojabohnen, bei denen der Proteinanteil 39 % beträgt. Kichererbsen enthalten mit einem Proteingehalt von 23 % in etwa doppelt soviel Eiweiß wie Getreide und etwas mehr als im Fleisch. Aus den ökonomischen und kulturellen Gründen sind Leguminosen in den afro-asiatischen Hauptmahlzeiten wesentliche Quellen für Eiweiß und Energie. Sie spielen in der menschlichen Ernährung eine wichtige Rolle, da sie reich an Protein, Nahrungsenergie, bestimmten Mineralien wie Calcium, Phosphor, Eisen, Zink, Mangan, Kupfer und Vitaminen (A, E, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>6</sub>) sind [4]. Sie werden anteilig als Zugabe zum konventionellen Getreide benutzt und als Mischbrot gebacken. Sie erhöhen den Proteingehalt des Gebäckes und können den

Ernährungsstatus des Getreides verbessern. Getreideproteine auf Basis des Weizens sind am Beispiel der notwendigen essentiellen Aminosäure „Lysin“ als nicht ausreichend einzuschätzen [5]. Kichererbsen dagegen enthalten eine ausreichende Menge an Lysin, dafür sind die schwefelhaltigen Aminosäuren Methionin und Cystein unzureichend vorhanden. [6, 7]. Man kann die Kichererbsen fertig gekocht in Dosen oder als getrockneten Samen kaufen, ähnlich wie die grünen Erbsen. Die getrockneten Samen werden kalt eingeweicht (12 - 24 Stunden und länger) und dann beispielsweise als Eintopf oder Püree zubereitet. Geröstete Kichererbsen werden auch als Snack Food verwendet. Aus gewürztem Kichererbsenbrei wird der im Nahen Osten und Nordafrika weit verbreitete „Falafel“ hergestellt. In der syrischen Küche ist auch eine Paste u. a. aus Kichererbsen und Sesam "Hommos we Tahini" sehr verbreitet. Aus Kichererbsenmehl (KE-Mehl) wird in Indien sogar Brot hergestellt. Brot und Kleingebäck werden aus verschiedenen Getreidearten hergestellt, wobei der Weizen eine besondere Rolle spielt. Diese Rolle beruht auf der Fähigkeit des Weizenmehles, durch Zugabe von Wasser und Zuführung von mechanischer Energie durch Mischen und Kneten eine viskoelastische Masse auszubilden, die als Teig bezeichnet wird, aus dem sich verschiedene Gebäcke herstellen lassen. Die Brotbackverfahren ermöglichen die Anwendung der unterschiedlichen Ergänzungsquantitäten durch gezielte Zugaben. Bei der Herstellung der Brotprodukte unter Anwendung neuartiger Zusätze ist es notwendig, den sensorischen und ernährungsphysiologischen Wert zu erhöhen und zu verbessern sowie einen Beitrag zur Verringerung der Zivilisationskrankheiten zu leisten [8]. Brotherstellung durch Ergänzung von WM-Mehl mit KE-Mehl sichert eine ausgewogene Ernährung. Die Formulierung des Brotes soll für den Verbraucher sensorisch akzeptabel sein und gleichzeitig ein ernährungsphysiologisch wertvolles Lebensmittel darstellen. Die viskoelastischen Eigenschaften des Teiges sollen durch den reduzierten Weizeneinsatz dabei weitgehend beibehalten werden. Zur Backwarenherstellung werden gegenwärtig am häufigsten folgende Zusätze verwendet: Basisgetreide, Weizenkeime, Vitalgluten sowie Leguminosenmehl und Ölsaaten. Die Ergänzung von KE-Mehl mit Getreidemehl besitzt dabei ein großes Potenzial in den Entwicklungsländern, um den Nährwert von verschiedenen gebackenen Produkten zu verbessern. [9, 10, 11, 12]. Hallab und Khatchadourian [13] haben herausgefunden, dass die Ergänzung von WM-Mehl durch KE-Mehlanteil von 30 % und mehr den Geschmack und die sensorische Akzeptanz des Brotes verringert. Die Einwirkung der vorkommenden antinutritiven Inhaltsstoffe in den unterschiedlichen Leguminosen kann durch die Wärmebehandlung während der Backverfahren beseitigt oder verringert werden [14]. Die Untersuchungen von Weizen als Brotgetreide wurden in den letzten 200 Jahren in aller Welt wissenschaftlich mit großer Intensität durchgeführt. Intensiv wurde die Verarbeitung von Weizenmehl zu Brot bei der industriellen Herstellung durch entsprechende Forschungen begleitet. Bei den Kichererbsen beschränkt man sich bisher auf die Untersuchung der mehr ernährungsphysiologischen Aspekte durch die Zumischung zum WM-Mehl. Strukturuntersuchungen zur Bewertung der Teigverarbeitungseigenschaften bei mit Kichererbsenmehl angereicherten Weizenteigen sind Gegenstand der nachstehenden Dissertationsschrift.



## 2. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, neuartige Backwaren mit erhöhter Funktionalität zu untersuchen, die sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, ihres Geschmacks sowie ihrer Textur und Struktur von herkömmlichen auf dem Markt befindlichen Backerzeugnissen unterscheiden und gleichzeitig einen ausgewogenen Gehalt an ernährungsphysiologisch wertvollen Inhaltsstoffen aufweisen.

Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Einsatz von Mehlmischungen aus Kichererbsen- und Weizenmehlen. Um die Mischmehlverwendung gezielt zur qualitativen und quantitativen Verbesserung des Brots einsetzen zu können, sollen die materialwissenschaftlichen und technologischen Kennwerte, insbesondere die rheologischen Eigenschaften des Teiges dieser Mehlmischungen bei drei unterschiedlichen Mischverhältnissen Kichererbsen- zu Weizenmehl (10:90, 20:80, 30:70) sowie weiter differenziert für drei verschiedene Fraktionen des Kichererbsenmehles mit unterschiedlicher Partikelgröße (Kornbandbreite) untersucht werden. Während Weizenmehlteig durch die Ausbildung eines Klebnetzwerkes ein viskoelastisches Materialverhalten aufweist, liegen bei Kichererbsenteig plastische bzw. klebrige/adhäsive Eigenschaften vor.

Diese Veränderungen der Teigstruktur infolge unterschiedlicher Inhaltsstoffe besitzen erhebliche Auswirkungen auf die weiteren Verarbeitungsschritte, auf die Auswahl der zu verwendeten Prozesstechnik, auf die Gärzeiten und auf den Backprozess und zuletzt auf die Qualität der Backware.

Zu untersuchen ist im Labor- bzw. kleintechnischen Maßstab der gesamte technologische Ablauf, beginnend mit der Zerkleinerung und der optimalen Benetzung. Das benötigte Kichererbsenmehl wird im Rahmen der Untersuchungen selbst durch hydrothermische Zerkleinerung im Mühlentechnikum der Getreideverarbeitung hergestellt. Das erzeugte Partikelspektrum ist zu erfassen und am Beispiel von Einzel- und Summenhäufigkeit zu differenzieren. Fraktionen sind davon zu gewinnen und deren Eigenschaften im Vergleich mit der Grundgesamtheit vergleichend zu bewerten.

Weizen- und Kichererbsenmehl sowie Kichererbsenfraktionen wurden eingemischt. Daraus wurde Teig hergestellt und materialwissenschaftlich untersucht. Die Charakterisierung der rheologischen bzw. Backeigenschaften von Weizenmehlteig gemischt mit Kichererbsenanteil sollen mit konventionellen Untersuchungen (Farinograph, Extensograph und Micro Visko-Amylo-Graph) sowie dynamische Untersuchungen (Oszillationsversuch, Kriechversuch und Temperaturversuch) mit modernen Messverfahren (Luftlagertechnik) vergleichend durchgeführt werden. Der Einfluss der Zugabemasse (Konzentration) von Kichererbsen und deren Fraktionen sowie der Einfluss der Einteigtemperatur, der Teigausbeute und Salzkonzentration auf das Verarbeitungsverhalten des Teigs sind zu untersuchen und fachlich zu bewerten. Sensorische Tests sollen die Akzeptanz und die Beschaffenheit der hergestellten Backwaren sowie eine Bewertung nach DLG-Kriterien ermöglichen. Zuletzt soll die Backfähigkeit/Bäckereitauglichkeit von verschieden gentechnisch modifiziertem Mais mit Hilfe konventionelle und moderne rheologische / materialwissenschaftliche Verfahren nachgewiesen werden.

### 3. Literaturrecherche

#### 3.1. Aufbau und Qualität von Kichererbsen

##### 3.1.1. Der Kichererbsenmarkt weltweit und in Syrien

Die Kichererbsenproduktion variiert von Jahr zu Jahr. Die Weltproduktion wird von der FAO auf etwa 9 774 082 t (2009) geschätzt, wobei etwa 8 477 063 t auf Asien, 61 133 t auf Europa, 475 029 t auf Afrika, 305 604 t auf Mittel- und Nordamerika und 10 253 t auf Südamerika entfallen. Australien und Ozeanien teilen sich den Rest auf etwa 445 000 t [15]. (siehe Abb. 3.1)

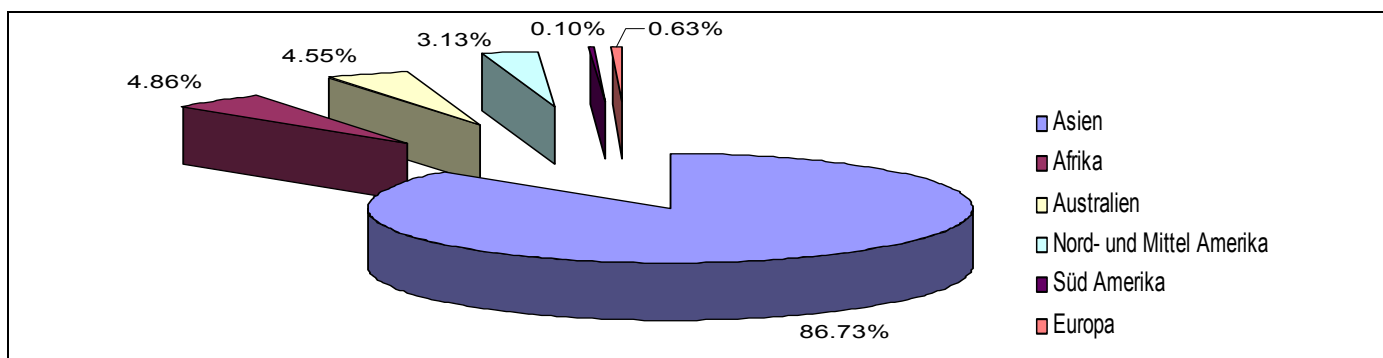


Abb. 3.1. Die Verteilung der Kichererbsenproduktion auf der Welt

In der Tab. 3.1 sind die statistischen Daten der FAO und der arabischen Organisation für landwirtschaftliche Entwicklung (AOAD) zusammengefasst.

Tab. 3.1: Kichererbsenproduktion in Syrien Import und Export-Zahlen [15, 16].

Jahr	Produktionsmenge	Ertrag	Angebaute Fläche	Import	Export
	1000 t	kg/ha	1000 ha	1000 t	1000 t
Durchschnitt 2001 - 2005	<b>67,00</b>	<b>743</b>	<b>90,22</b>	<b>5,74</b>	<b>11,48</b>
2006	<b>51,88</b>	<b>830</b>	<b>62,53</b>	<b>2,50</b>	<b>2,05</b>
2007	<b>50,04</b>	<b>585</b>	<b>85,59</b>	<b>7,27</b>	<b>0,56</b>
2008	<b>27,11</b>	<b>358</b>	<b>75,78</b>	<b>2,67</b>	<b>0,16</b>
2009	<b>57,35</b>	<b>777</b>	<b>73,80</b>	-	-

##### 3.1.2. Ernährungsphysiologische Eigenschaften von Leguminosen

Das Wertschöpfungspotential von Proteinprodukten wird im Wesentlichen von deren ernährungsphysiologischen und funktionellen Eigenschaften determiniert. Diese Eigenschaften stellten somit wichtige Zielgrößen zur Beschreibung der im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Proteinprodukte dar. Die mit der Nahrung aufgenommenen Proteine werden vom menschlichen und tierischen Organismus insbesondere zum Aufbau körpereigenen Proteins verwendet. Inwieweit die Proteine in dieser Weise vom Organismus genutzt werden können, hängt vor allem von deren Aminosäurezusammensetzung (AMS)

sowie deren Verdaulichkeit und nutritiven Verfügbarkeit ab. Hinsichtlich der AMS-Zusammensetzung ist hauptsächlich der Gehalt an essentiellen AMS entscheidend, da diese vom menschlichen Organismus nicht synthetisiert werden können. Die AMS-Zusammensetzung von KE-Protein ist weitgehend bekannt. KE-Protein ist im Hinblick auf seine AMS-Zusammensetzung mit Sojaprotein vergleichbar. Im Hinblick auf ihre ernährungsphysiologische Wertigkeit sind sowohl Kichererbsen- als auch Sojaprotein durch einen geringeren Gehalt an schwefelhaltigen Cystein und Methionin limitiert [17].

Tab. 3.2: Aminosäurezusammensetzung in Kichererbsen und Weizen in % von Protein, **rote Hervorhebung:** schwefelhaltige Aminosäuren \*= essentiell [1, 19, 20]

Aminosäure (% von Protein)	WM	KE	FAO/WHO
Lysin*	2,9	7,2	5,5
Threonin*	2,9	3,1	4,0
Valin	4,5	4,6	5,0
Methionin*	1,5	1,1	3,5
Cystein*	2,3	0,6	
Isoleucin*	3,7	4,8	4,0
Leucin	6,8	8,7	7,0
Phenylalanin*	4,2	5,5	6,1
Tyrosin	3,0	2,8	
Tryptophan*	1,2	0,9	1,0
Arginin	4,7	8,3	-
Histidin	2,3	3,0	-
total Protein (%)	11,2	22,7	

Als herausragendes positives Merkmal der Kichererbsen ist ihr ausgesprochen hoher Lysingehalt zu nennen. Dies legt aus ernährungsphysiologischen Gesichtspunkten eine Kombination dieser Proteine z. B. mit Weizenprotein nahe, da hier Lysin die limitierende Komponente ist und diese hohen Anteile an schwefelhaltigen AMS besitzen. Als wertvoll ist der Lysingehalt der Kichererbsen zu bewerten. Da in den Getreideproteinen das Lysin die Wertigkeit limitiert und Thiol-Gruppen in ausreichender Menge vorhanden sind, wird bei gleichzeitigem Verzehr oder der Stoffwechslung von Getreide und Leguminosen die Proteinwertigkeit beider Komponenten wesentlich verbessert [18]. Aus der Gegenüberstellung der Anteile essentieller AMS geht hervor, dass durch den vergleichsweise niedrigen Gehalt an schwefelhaltigen AMS

in Kichererbsen die Proteinwertigkeit limitiert wird. Der menschliche Organismus benötigt für den Aufbau körpereigener Eiweiße 22 AMS. Mindestens 8 dieser 22 AMS sind für den Menschen essentiell, d. h. der Organismus benötigt sie zum Überleben, kann sie aber nicht selbst herstellen. Sie müssen über die Nahrung aufgenommen werden. Der essentielle AMS-Anteil ist in der Kichererbse höher als von der FAO/WHO empfohlen. Die Qualität eines Proteins kann eingeschätzt werden, indem man die AMS-Zusammensetzung mit Standardbezugsmustern (FAO/WHO) vergleicht. Die AMS-Zusammensetzung und der Anteil der essentiellen AMS, die vom tierischen und menschlichen Organismus nicht aufgebaut werden können, bestimmen die biologische Wertigkeit von Protein der verschiedenen Leguminosen. Neben dem Proteingehalt von Nahrungsmitteln spielt besonders die biologische Wertigkeit der Proteine, die aus der AMS-Zusammensetzung resultiert, eine entscheidende Rolle. Neben der AMS-Zusammensetzung ist im Hinblick auf die ernährungsphysiologische Wertigkeit von Proteinprodukten auch deren Gehalt an Begleitstoffen mit antinutritiver Wirkung von Bedeutung.

Im Zusammenhang mit Leguminosenproteinen sind diesbezüglich insbesondere Trypsininhibitoren, Hämagglutinine, Phytinsäure sowie Tannine zu nennen [21].

### 3.1.3. Morphologie und chemische Zusammensetzungen der Kichererbsen

Der Begriff Leguminosen bezeichnet sowohl die Pflanzenfamilie, wie auch die Pflanzen selbst und ihre Samen. Die Früchte dieser Pflanzen bestehen in der Regel aus einer Hülse, die mehrere Samen enthält. Im Allgemeinen enthält der Samen Nährgewebe. Die Speicherung der Reservestoffe erfolgt im Embryosackgewebe, das in dieser Funktion kurz als Endosperm bezeichnet wird. Der Embryo bleibt bei diesen Samentypen klein. Anders ist es u. a. bei den Leguminosae, die das gesamte Nährgewebe kaum bis gar nicht besitzen, sondern die Reservestoffe vor allem in den Kotyledonen (Keimblättern) speichern. Obwohl die äußere Form und das Aussehen von Leguminosen große Unterschiede aufweisen, zeigt ihr Aufbau große Übereinstimmungen auf. Die Unterteilung der Samen in die Samenschale und die zu Reservestoffbehältern ausgebildeten Keimlinge ist bei allen Leguminosen gleich.

Die Zellenwände bestehen vorwiegend aus Pektin und besonders im Bereich der Lichtlinie aus Cellulose, jedoch sind weder Lignin noch Proteine festzustellen. Die inneren Zellen der Keimblätter bestehen überwiegend aus Aleuronkörnern, Stärkekörnern und Plasmaresten. Durch die Symbiose mit Knöllchenbakterien steht den Leguminosen in aller Regel ausreichend Stickstoff für die Proteinbiosynthese zur Verfügung, so dass im Vergleich mit anderen Kulturen die Proteingehalte der Samen recht hoch sind. Dies wird damit begründet, dass überwiegend Globuline enthalten sind, die als Reservestoffe für die Keimung der Pflanze eine wichtige Rolle spielen.

Der Hauptanteil an den Leguminosensamen nimmt, wie schon dargelegt, der Embryo ein, und davon wiederum die großen, dickfleischig ausgebildeten Keimblätter, die als Speicherorgane das nur spärliche oder überhaupt nicht vorhandene Endosperm (Nährgewebe) ersetzen. Sie enthalten hauptsächlich einfache Stärkekörner, Fette und Aleuronkörner, daneben noch Dextrin, Galaktane u. a. in geringen Mengen. Die Testa (Samenschale) mit ihrem hohen Rohfaseranteil kann in der Tier- oder auch Humanernährung als Ballaststoff wesentliche ernährungsphysiologische Funktionen besitzen [22, 23, 24].

**Die Kichererbse *Cicer arietinum* L.** nimmt den dritten Rang der Leguminosenerzeugung in der Welt ein. Sie ist ein wichtigstes Lebensmittel in den Ländern des Nahen Ostens. Die Hälfte der weltweit produzierten Kichererbsen im Jahr wird aus Syrien und der Türkei ausgeführt. [25]. Die Kichererbse ist eine einjährige, krautige Pflanze mit kräftiger Pfahlwurzel. Der aufrecht stehende, vierkantige Stängel wird 30...60...100 cm hoch und ist je nach Standort mehr oder weniger verzweigt. Die ganze Pflanze ist blaugrün bis graugrün gefärbt. Die Blüten stehen einzeln in den Blattachseln an einem langen, geknieten Stiel.

Die aufgedunsenen, nickenden, an einem gebogenen Stiel stehenden Hülsen werden 2 bis 3 cm lang und 1,5 cm breit und enthalten ein oder zwei, selten drei pyramidenförmige Samen. Die Farbe der Samen ist braun, rötlichorange oder gelblichweiß. Der Nabel ist klein, rundlich und die Samenschwiele deutlich

hervortretend. Das Tausendkorngewicht schwankt zwischen 110 und 380 g [26, 27].



Abb. 3.2: Kichererbsen (Pflanze, Korn)

Tab. 3.1: Chemische Zusammensetzung der Kichererbsen (Angaben in % TS) nach [21, 28].

Kichererbsen	Wasser	Rohprotein	Kohlenhydrate	Rohfett	Rohfaser	Mineralstoffe
	7,8	22,7	52,1	5,3	9,8	2,9

### 3.1.3.1. Kichererbsenproteine und deren funktionelle Eigenschaften

Die Proteine sind neben der Stärke die wichtigsten Inhaltsstoffe der Kichererbsen und von großer technologischer und ernährungsphysiologischer Bedeutung. Sie sind in allen Teilen des Kichererbsenkorns enthalten. Für die Anwendung von Proteinprodukten im Lebensmittelbereich sind neben deren ernährungsphysiologischen insbesondere deren funktionelle Eigenschaften wichtig. Gemäß der Definition von MORR und HA [29] sollen darunter alle physikochemischen Eigenschaften verstanden werden, welche die Struktur, das Aussehen, die Textur, das Viskositätsverhalten, das Mundgefühl und die Bindung von Aromastoffen beeinflussen. Zu den bedeutendsten funktionellen Eigenschaften von Proteinen gehören die Löslichkeit, das Wasser- und Fettbindevermögen sowie die Schaum- und Gelbildungs- sowie Emulgiereigenschaften. Die Löslichkeit nimmt unter den funktionellen Eigenschaften von Proteinprodukten eine herausragende Stellung ein. Das Wasserbindevermögen von Proteinen kann u. a. zur Beeinflussung der Texturausbildung von Lebensmittelsystemen genutzt werden. Von besonderer Bedeutung ist diese Eigenschaft bei der Herstellung von Pasteten, Fleischanalogen, Füllmassen und Backwaren [30, 31].

Die Fähigkeit der Proteine, Fett zu binden wird insbesondere bei der Herstellung von Fleischprodukten und Fleischanalogen genutzt. Eine weitere wichtige Funktion erfüllen Proteine im Zusammenhang mit der Herstellung und Stabilisierung von Emulsionen und Schäumen. Die Aleuronschicht und die Keimblätter besitzen den jeweils höchsten Proteingehalt.

Die Anteile der Fraktionen im vollständigen Samen und im Keimblatt der Kichererbsen werden in Tab. 3.4 aufgeführt. Der Methionin- sowie der Cysteingehalt der verschiedenen Keimblattproteinfraktionen weisen eine breites Ereignisfeld auf.

Tab. 3.2: Anteil der Proteinfractionen im vollständigen Samen und Keimblatt der Kichererbsen [19, 32].

Proteinfraction	Ganzes Korn %	Cotyledona %
Albumin	12.6	15.9 (5.3)
Globulin	56.6	62.7 (1.8)
Glutenine	18.1	17.5 (2.6)
Prolamin	2.8	2.3 (0.4)
Rest	4.9	1.0
Total	95.0	99.4

Die wichtigsten Reservestoffe sind Eiweiße, die überwiegend zu den Globulinen wie Albumin, Legumin, Glutelin, gehören. Die Fraktionen bestehen hauptsächlich aus Globulin 56,6 % und Albumine 12,6 % [32]. Globulin ist damit der Hauptproteinbestandteil in den Kichererbsen. Da der Inhalt an Methionins und Cystein ziemlich niedrig ist, besteht insgesamt ein Mangel an schwefelhaltigen AMS im vollständigen Korn. Die Proteinqualität der Kichererbsen hängt dabei mit den Anteilen der verschiedenen Proteinkategorien zusammen.

### 3.1.3.2. Kohlenhydrate der Kichererbsen

Es wird zwischen löslichen bzw. verdaulichen Kohlenhydraten und so genannten Rohfaser- oder Ballaststoffen unterschieden. Im vollreifen Korn liegen die Kohlenhydrate weitgehend (etwa 95 %) in hochpolymerer Form vor. Die Fraktion der löslichen Kohlenhydrate besteht aus Stärke, wobei Kichererbsen viel Stärke in der TS enthalten (49 ... 51,5 %). Ein wesentliches Merkmal der Kichererbsen ist ihr



Abb. 3.3: Mikroskopische Aufnahme der Stärke [36].

vergleichsweise hoher Gehalt an Oligosacchariden. Die aus Amylose (34,5 - 39 % der Stärke) und Amylopektin aufgebaute Stärke findet sich praktisch nur im Mehlkörper. Die Stärkekörner besitzen eine Größe von 18 bis 23  $\mu\text{m}$ , wobei Extrema zwischen 8  $\mu\text{m}$  und 60  $\mu\text{m}$  festzustellen sind [33, 34, 35].

Getreide und Leguminosen besitzen einen besonders großen Gehalt an Ballaststoffen

Kichererbsen besitzen einen weit größeren Anteil an löslichen Ballaststoffen als Getreideballaststoffe. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Vergleich mit Getreide in den Leguminosen ein größeres Verhältnis aus den löslichen Ballaststoffen, darunter vor allem pektinartige Substanzen, und anderen Inhaltsstoffen vorhanden ist. Die Fraktion der Rohfasern oder Ballaststoffe, die aufgrund chemischer Analysenverfahren von den löslichen Kohlenhydraten abgegrenzt wird, besteht vornehmlich aus Zellulose, Pento- und Hexosanen und Lignin.

### 3.1.3.3. Lipide der Kichererbsen

Die Lipide sind trotz ihres geringen Anteils in den Kichererbsen mit etwa 5,3 % in biochemischer und funktioneller Hinsicht bedeutsame Inhaltsstoffe. Sie sind einerseits unspezifische Energieträger in der Nahrung, sie liefern aber in Form der mehrfach ungesättigten Fettsäuren essentielle Bausteine für den menschlichen und tierischen Organismus. Die Fette der Kichererbsen zeichnen sich durch einen hohen Anteil ungesättigter Fettsäuren aus und sind somit ernährungsphysiologisch wertvoll.

## 3.2. Aufbau und Qualität von Weizen

### 3.2.1. Der Weizenmarkt weltweit und in Syrien

Die Weltproduktion des Weizens wird von der FAO auf etwa 681 915 838 t (2009) geschätzt [15].

In Abb. 3.4 ist die Verteilung der Weizenproduktion auf der Welt dargestellt.

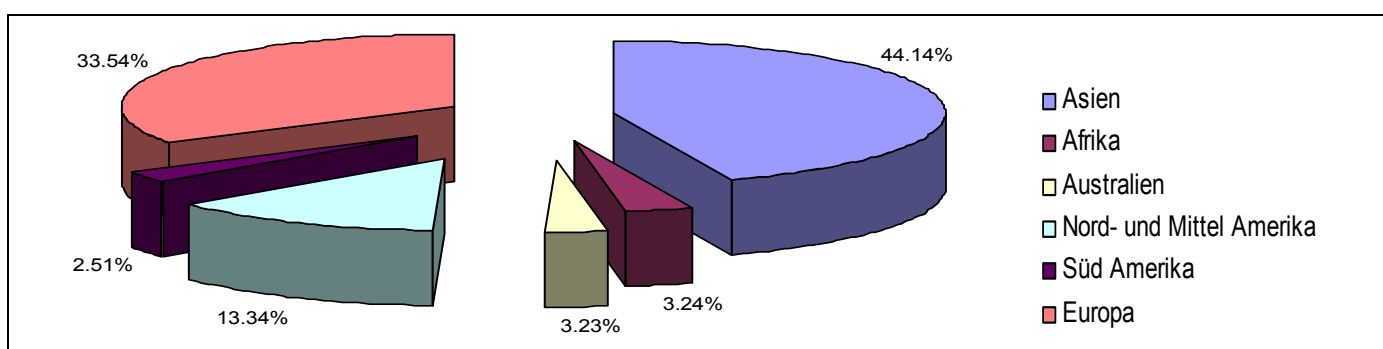


Abb. 3.4. Die Verteilung der Weizenproduktion auf der Welt

In der Tab. 3.5 sind die statistischen Daten der FAO und der arabischen Organisation für landwirtschaftliche Entwicklung (AOAD) zusammengefasst.

Tab. 3.5: Weizenproduktion in Syrien Import und Export-Zahlen [15, 16]

Jahr	Produktionsmenge	Ertrag	Angebaute Fläche	Import	Export
	1000 t	kg/ha	1000 ha	1000 t	1000 t
Durchschnitt 2001 - 2005	<b>4727,71</b>	<b>2658</b>	<b>1778,86</b>	<b>75,840</b>	<b>556,19</b>
2006	<b>4932,00</b>	<b>2760</b>	<b>1787,00</b>	<b>154,73</b>	<b>1404,5</b>
2007	<b>4041,10</b>	<b>2423</b>	<b>1667,73</b>	<b>44,570</b>	<b>997,51</b>
2008	<b>2139,31</b>	<b>1440</b>	<b>1485,99</b>	<b>310,70</b>	<b>164,49</b>
2009	<b>3701,78</b>	<b>2575,3</b>	<b>1437,38</b>	-	-

### 3.2.2. Morphologie und chemische Zusammensetzung von Weizen

Das Weizenkorn besteht aus zusammengewachsener Frucht- und Samenschale, Endosperm (Aleuronschicht und Mehlkörper) und Keimling (Embryo). Der Mehlkörper ist mit etwa 82 % der wichtigste Teil des Weizenkorns. Er wird aus großen, dünnwandigen Zellen gebildet, in denen sich Stärke und als



Einbettungssubstanz Protein befinden. Die den Mehlkörper umhüllende Aleuronschicht besteht aus Zellen, die reich an Proteinen, Lipiden, Mineralstoffen und Enzymen sind. Die Proteine der Aleuronzellen (Albumine) sind nicht zur Glutenbildung fähig. Der Keimling enthält die höchsten Protein- und Lipidanteile, weiterhin Kohlenhydrate (Nicht-Stärke- Polysaccharide), Mineralstoffe und Enzyme. Die Proteine des Keimlings (Globuline) sind ebenfalls nicht zur Glutenbildung fähig. Die Schale besteht zum größten Teil aus Zellulose und Pentosanen, und enthält ferner Proteine sowie Mineralstoffe.

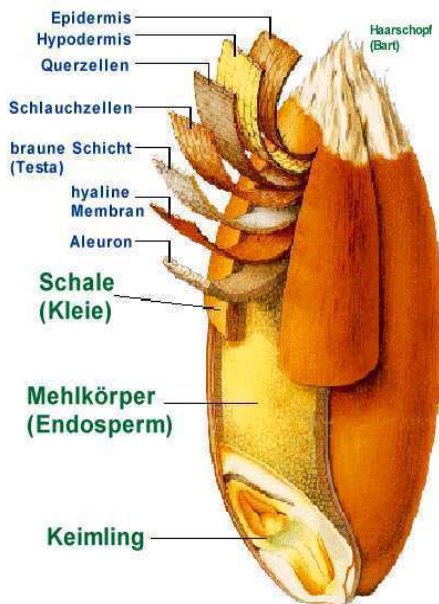


Abb. 3.5: Aufbau des Weizenkorns [37]

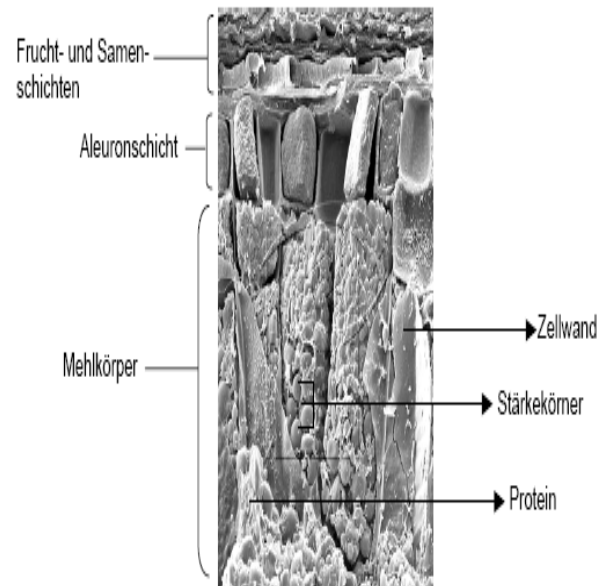


Abb. 3.6: Mikroskopische Aufnahme von Weizenkorn [38]

Die chemische Zusammensetzung des Weizenkorns veranschaulicht die Tab. 3.6. Die Anteile der Bestandteile können in Abhängigkeit von der Sorte und den Anbaubedingungen variieren.

Tab. 3.6: Zusammensetzung des Weizenkorns in % TS [39]

Kornteil	Anteil	Protein	Asche	Stärke	Rohfaser	Zellulose	Pentosane	Lipide
Schale	8,00	6,90	3,40	0,00	23,9	27,0	46,6	0,80
Aleuronschicht	7,00	31,7	10,9	0,00	6,60	5,30	28,3	9,10
Keimling	2,50	34,0	4,50	0,00	2,40	-	-	27,6
Mehlkörper	82,5	12,6	0,60	80,4	0,30	0,30	3,30	1,60

### 3.2.2.1. Weizenproteine und deren funktionelle Eigenschaften

Die Proteine sind neben der Stärke die wichtigsten Inhaltsstoffe des Weizens und von großer technologischer und ernährungsphysiologischer Bedeutung. Sie sind in allen Teilen des Weizenkorns enthalten. Die Aleuronschicht und der Keimling besitzen den jeweils höchsten Proteingehalt, jedoch enthält der Mehlkörper wegen seines hohen Anteils am Gesamtkorn die Hauptmasse des Gesamtproteins mit etwa 70 %. In der Tab. 3.7 sind die Proteinfractionen nach ihrer Löslichkeit zusammengefasst.



Tab. 3.7: Anteile und Löslichkeit der Weizenproteine in % [40]

Weizenprotein	Anteil	Löslichkeitsverhalten	Eigenschaft
Albumin	3-5	<b>löslich in Wasser</b>	-
Globulin	6-10	<b>löslich in salzhaltigem Wasser</b>	-
Prolamin (Gliadine)	40-50	<b>löslich in 70 %tigem Ethanol</b>	<b>dehnbar, viskos</b>
Glutenine (Rückstand)	30-40	<b>unlöslich in Ethanol</b>	<b>wenig fließfähig, elastisch</b>

Weizenmehl enthält ca. 10 - 14 % Kleberproteine. Man unterscheidet beim Aufbau der Proteine in vier Strukturtypen. Primär-, Sekundär-, Tertiär- und Quartärstruktur liegen zustandsabhängig vor. Die Proteine des Weizens unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer Zusammensetzung als auch in ihren physikalischen Eigenschaften wie Dissoziation und Löslichkeit.

Darüber hinaus werden die im Weizenmehl vorkommenden Proteine nach ihrem Löslichkeitsverhalten klassifiziert. Die Klassifizierung geht auf Osborne zurück.

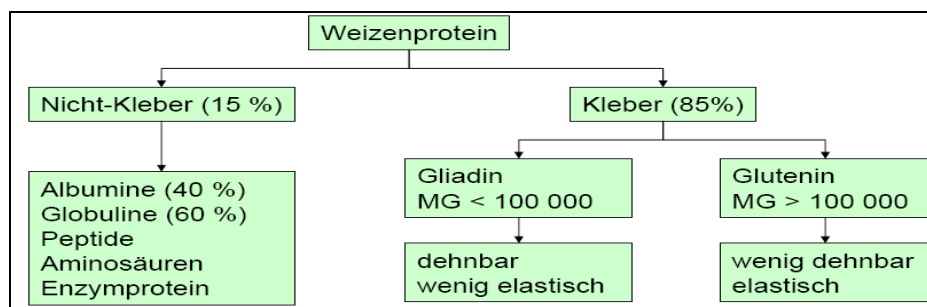


Abb. 3.7: Komponenten der Weizenproteine [41]

Die Glutenproteine sind die beiden quellfähigen Speicherproteine Gliadine und Glutenine; sie bilden den Proteinkomplex Gluten. Das Gluten hat die Fähigkeit, das während der Fermentation entstehende Gas zurückzuhalten. Der Backprozess führt dann zur Ausbildung eines voluminösen Brotes (Schaumstruktur). Daher werden die wichtigsten Qualitätsmerkmale eines Weizenmehles (Teigbeschaffenheit und Backvolumen) wesentlich den Glutenproteinen zugeschrieben. Die wasser- sowie salzwasserlöslichen Proteine (Albumin, Globulin) sind nichtglutenbildende Proteine. Sie befinden sich hauptsächlich im Keim und in der Aleuronschicht, sie sind aber auch im Endosperm lokalisiert, z. B. in der Zellwand und an der Stärke. Diese Proteine gelten aufgrund ihrer biologischen Funktion als ernährungsphysiologische Proteine. In der Literatur gibt es unterschiedliche Angaben über die Anteile der Weizenproteine.

Die Albumine haben ein Molekulargewicht zwischen 17-28 kDa. Die Globuline zeichnen sich durch einen besonders hohen Anteil an SH-Gruppen sowie SS-Gruppen aus. Qualitativ bessere Weizenmehle haben im Allgemeinen einen höheren Anteil an salzwasserlöslichen Proteinen als schwache Mehle. Ein positiver Zusammenhang zwischen dem Globulingehalt und dem Brotvolumen wurde festgestellt, während die Albumine eine negative Beziehung mit dem Brotvolumen zeigten [41]. Auf die Backqualität haben Menge und Qualität der Protein- und Stärkekomponten des Weizens entscheidenden Einfluss.

Die Wasseraufnahmefähigkeit des Mehles, die Teigeigenschaften und das Backvolumen sind die wichtigsten Kennwerte zur Beurteilung der Backqualität. Die Proteinmenge und -qualität, der Stärkezustand und der durch den Vermahlungsprozess entstandene Stärkebeschädigungsgrad beeinflussen die Wasseraufnahme. Auch bei Behandlung des Weizens bzw. des Weizenmehls z. B. thermisch oder hydrothermisch, wird die Qualität der Proteine beeinflusst. Somit kann die Glutenbildung beeinträchtigt werden. In Gegenwart von Wasser und unter Einwirkung einer mechanischen Energie in Form des Schergefälles beim Kneten bildet sich der Teig. Es ist bekannt, dass die Wasseraufnahme, die Knetzeit und Teigstabilität sowie der Dehnwiderstand und die Dehnbarkeit mit dem Proteingehalt sehr gut korrelieren [42]. Dabei entsteht aufgrund der Wechselwirkung zwischen den wasserunlöslichen Proteinfractionen Gliadine und Glutenine eine dehnbare und gummiartige Substanz, das Gluten. Die Trockenmasse des Glutens enthält über 80 % Protein, ca. 5 -10 % Stärke, 5 % Lipide und Spuren von Mineralstoffen [43]. Die äußerst komplex zusammengesetzten Kleberproteine, jede Weizensorte enthält mehr als hundert Komponenten, lassen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Löslichkeiten in die löslichen Gliadine und die unlöslichen Glutenine einteilen.

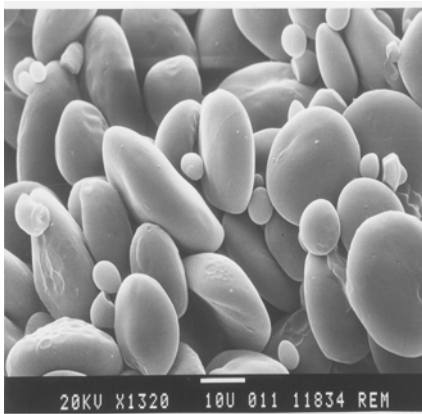
Die chemische Zusammensetzung der Glutenproteine steht in engem Zusammenhang mit den physikalischen Eigenschaften des Glutens und damit auch des Teiges. Die Gliadine liegen überwiegend Monomer vor ( $MG \approx 30 - 60 \text{ kDa}$ ), sie geben dem Kleber seine viskosen Eigenschaften. Die Glutenine ist über SS-Bindungen und nichtkovalenten Bindungen zu Aggregaten mit einem sehr breiten Molekulargewichtsbereich ( $MG \approx 100 - 20000 \text{ kDa}$ ) verbunden. Sie werden für die Festigkeit/Elastizität von Teig und Kleber verantwortlich gemacht [44]. Die elastischen Eigenschaften des Glutens bzw. Teiges sind den Glutenine zuzuschreiben. Damit bestimmen die Speicherproteine die physikalischen Eigenschaften des Glutens wie Kohäsivität, Festigkeit, Elastizität und Viskosität. Neben der AMS-Zusammensetzung, der Molekulargewichtsverteilung und der Anzahl sowie Art der Bindungen werden die physikalischen Eigenschaften des Glutens von den Lipo- und Glykoproteinen beeinflusst. Mit zunehmendem Molekulargewicht der Glutenine nimmt die Elastizität des Glutens zu, während Gliadine höherer Molekulargewichte zu einer Zunahme der Plastizität führen. Die Proteine weisen in Abhängigkeit von Art und der Anzahl ihrer funktionellen Gruppen sowohl hydrophobe als auch hydrophile Eigenschaften auf. Die SS-Bindungen sind signifikant für die Teigstruktur und verantwortlich für das dominant elastische Verhalten des viskoelastischen Systems Teig.

Rheologische Eigenschaften von Teigen werden vorrangig auf Wechselwirkungen zwischen den SS-Gruppen und SH-Gruppen zurückgeführt. Die SS-Bindungen spielen dabei eine wesentliche Rolle im Aufbau des Glutennetzwerks und beeinflussen somit die rheologischen Eigenschaften von Weizenteigen. Sie erhöhen die Elastizität des Teiges bzw. des Glutens. Im WM-Mehl liegen etwa 95 % des gesamten Cysteins als Disulfide vor. Die niedermolekularen Gliadine üben aufgrund ihrer hydrophoben Eigenschaften eine erweichende Wirkung auf den Weizenkleber aus. Sie setzen die Knetzeit eines Mehles herab und

verringern die Kleberfestigkeit [45]. Infolgedessen erhöht sich die Dehnbarkeit des Glutens bzw. des Teiges und der Dehnwiderstand des Glutens bzw. des Teiges kann somit verringert werden. Die Hydrophobizität des Gliadines ist auf AMS Glutamin und Prolin zurückzuführen. Die hydrophoben Wechselwirkungen sind für die Bildung von Komplexen zwischen Lipiden und Proteinen von größter Bedeutung. Die hochmolekularen Glutenine sind hydrophil. Durch Reduktion der SS-Bindungen werden Proteinuntereinheiten freigesetzt, die als Gliadine im wässrigen Ethanol löslich sind. Die Lipo- und Glykoproteine bewirken die Elastizität des Glutens durch hydrophobe Wechselwirkung bei der Ausbildung des Glutennetzwerks [46].

### 3.2.2.2. Kohlenhydrate des Weizens

Die Stärke ist ein durch Assimilation entstandenes Reservekohlenhydrat; sie ist im Weizenkorn ausschließlich im Mehlkörper lokalisiert [39]. Die Stärke ist im Hinblick auf ihren Masseanteil der bedeutsamste Inhaltsstoff des Weizens. Der Hauptmasseanteil der Stärkekörner in Weizenmehlen mit ca. 80 % liegt im Korngrößenbereich von 10 - 30 µm. Der Anteil an Stärkekörner < 10 µm macht etwa



20 % aus [48, 49]. Weizenstärke besteht aus etwa 25 % linearkettiger Amylose und 75 % stark verzweigtem Amylopektin, und enthält kleine Mengen Lipide, Proteine sowie Mineralstoffe.

Die funktionellen Eigenschaften der Weizenstärke in Hinblick auf ihre Verarbeitung zu Backwaren und Nahrungsmitteln beruhen auf komplexen Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Stärkekomponten und dem Wasser. Zu den wichtigsten Eigenschaften der Stärke zählen die Verkleisterung, Viskositätsausbildung, Retrogradation und die Gelbildung.

Abb. 3.8: Mikroskopische Aufnahme der Weizenstärke [50]

Diese Eigenschaften werden von mehreren Faktoren beeinflusst. Unter anderem kann die Art und der Umfang der Stärkebeschädigung durch die Vermahlung beeinflusst werden. Die Wasseraufnahme korreliert stark mit dem Anteil mechanisch beschädigter Stärke. Ein hoher Beschädigungsgrad führt zu einer höheren Wasseraufnahme und höherer Enzymsuszeptibilität. Die Quell- und Verkleisterungsvermögen der Stärke werden mit steigender Stärkebeschädigung verringert [51, 52]. Auf Basis des Zusammenhangs zwischen dem Proteingehalt und der Stärkebeschädigung im Mehl wurde ein mathematisches Modell für den optimalen Stärkebeschädigungsgrad erstellt [53].

Ballaststoffe kommen vor allem in den Randschichten und Gerüstgeweben des Getreides vor. Den höchsten anteiligen Gehalt haben die so genannten Kleieschichten.

Die Mengenangaben schwanken sehr mit der Analysenmethode. Die Verteilung der Ballaststoffe des Weizens ist in der nachfolgenden Tab. 3.8 enthalten.

Tab. 3.8: Verteilung der Ballaststoffe beim Weizen in % nach [41]

Gewebe	Ballaststoffe	Rohhemizellulose	Rohzellulose	Rohlignin
Schalen	<b>76,9</b>	<b>80,4</b>	<b>70,2</b>	<b>80,4</b>
Endosperm	<b>20,4</b>	<b>16,3</b>	<b>24,8</b>	<b>18,1</b>
Keimling	<b>2,70</b>	<b>2,10</b>	<b>3,70</b>	<b>2,10</b>

Pentosane sind Zellwandbestandteile und zählen zu den Nicht-Stärke-Polysacchariden. Chemisch bestehen die Pentosane vorwiegend aus Xylose und Arabinose. Ein Teil des Arabinoxylans enthält geringe Proteinmengen (Glycoproteine), außerdem Ferulasäurereste. Weizen weist mit 3 - 5 % niedrigere Pentosangehalte als Roggen mit 9 - 11 % auf. Man unterscheidet zwischen wasserlöslichen und wasserunlöslichen Pentosanen. Die letzteren werden der Literatur auch als Hemicellulose bezeichnet. Trotz des kleinen Masseanteils der Pentosane im Weizenmehl (etwa 2,5 %), können die Pentosane bei der Teigbereitung bis zu 20 % des Schüttwassers binden. Der wasserlösliche Anteil der Pentosane beträgt im Weizenmehl etwa 20 - 25 % des Gesamtpentosangehalts. Die Pentosane weisen ein enormes Quell- und Wasserbindevermögen auf, das erheblich größer ist als im Falle des Glutens.

Bei Wärmeeinwirkung verkleistern die Pentosane im Unterschied zu Stärke nicht, sie zeigen nach Abkühlung keine Retrogradation, sondern stören die Assoziation der Stärkopolymere und können die Brotalterung verzögern [40]. Durch die hohe Wasserbindung der Pentosane wurde die Viskosität des Teiges erhöht [54, 55]. Die wasserunlöslichen Pentosane verbesserten das Brotvolumen. Über die Wechselwirkungen der Pentosane mit den übrigen Mehlbestandteilen ist relativ wenig bekannt. Es wird angenommen, dass die Pentosane beim Anteigen mit Proteinen reagieren. Durch Zugabe von Pentosanen wurde eine geringe Abnahme des Glutengehaltes im Mehl festgestellt. Dabei wurden die Wasseraufnahme und die Teigentwicklungszeit erhöht [56]. Der Zusatz von bestimmten pentosanabbauenden Enzymen zum Mehl bewirkt eine Zunahme des Backvolumens.

### 3.2.2.3. Lipide des Weizens

Die Lipide sind trotz ihres geringen Anteils im Weizenkorn mit etwa 1,8 % in biochemischer und funktioneller Hinsicht bedeutsame Inhaltsstoffe. Man unterscheidet zwischen polaren und neutralen Lipiden, die ungleichmäßig auf die Gewebeteile des Korns und auch innerhalb des Endosperms verteilt sind. Weizen enthält 70 % polare Lipide und 30 % neutrale Lipide [57]. Die Lipide des Mehles beeinflussen zwar die Verarbeitungseigenschaften; sie beherrschen sie aber nicht. Es gibt stärkegebundene und nichtstärkegebundene Lipide. Die stärkegebundenen Lipide begünstigen durch die hydrophobe Wechselwirkung mit den Glutenproteinen die Haftung der Stärke im Glutennetzwerk. Lipide werden als Emulgator auch für die Verbesserung der Frischhaltung in Backwaren eingesetzt. In der Weizenbrotherstellung verbessern Emulgatoren die Verarbeitungseigenschaften der Teige und das Backergebnis. Die Wirkung erstreckt sich auf die Knetenergie, die Knettoleranz, die Gärzeit, die Oberflächenbeschaffenheit der Teige, die Teigstabilität, die Porengröße und Porengleichmäßigkeit, die

Krumenelastizität, die Krumenalterung und vor allem das Gebäckvolumen. Ein Weizenteig stellt nach der Gärphase einen Schaum dar. Emulgatoren könnten diese Phasen gleichmäßig verteilen und ihre anschließende Entmischung verhindern. Dadurch würde der Teig ein unelastischer Schaum [58].

### 3.3. Stand des Wissens zur Zerkleinerung und Sieben von Getreide

Die Mühlentechnik der Getreidemahlprozesse können nach der Art der Konstruktion geordnet werden: Hammermühle, Prallmühlen, Walzenstuhl, Kugelmühle, Rohrmühlen, Trommelmühlen, Scheibenmühlen und Schneidmühlen. Für die Weizenvermahlung werden hauptsächlich die Walzenstuhlanlagen genutzt, während für die härteren KE bietet sich der Einsatz der Hammermühle an.

#### 3.3.1. Wirkprinzip der Hammermühle

Eine Hammermühle ist eine Zerkleinerungsmahlmaschine. Ihre Aufgabe ist die schnelle und gründliche Zerkleinerung. Daher eignet sie sich für die verschiedensten Rohgüter unter anderen als Getreide- und Futtermühle in der Lebensmittelindustrie. Sie wird bei der Zerkleinerung von den verschiedensten Materialien eingesetzt. Die Mahlarbeit geschieht durch den Schlag-, Prall- und Schereffekt. In einem Metallgehäuse dreht sich ein Rotor, an dessen äußerem Umfang eine anwendungsspezifische Anzahl beweglicher Stahlhämmer befindet. Diese sind pendelnd angebracht. Das Zerkleinerungsgut trifft auf die rotierenden Hämmer wobei der größte Zerkleinerungseffekt erzielt wird. Im Bereich des Rostkorbes erfolgt die Zerkleinerung durch Schlag-, Scher- und Prallbeanspruchung. Das Mahlgut verbleibt so lange in der Zerkleinerungszone, bis es die entsprechende Feinheit erreicht hat, so dass es durch ein (austauschbares) Hammerkorb am äußeren Umfang der Maschine passt. Die Abbildung. 3.9 veranschaulicht das Wirkprinzip einer Hammermühle.

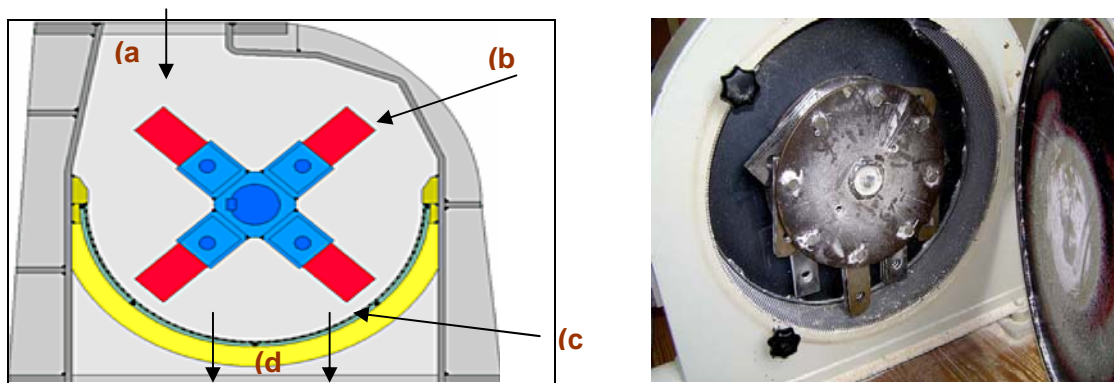


Abb. 3.9: Wirkprinzip der Hammermühle (a – Aufgabe, (b – Sieb, (c – Hammer, (d – Feingut [59]

Die Endfeinheit des Fertiggutes wird bei Hammermühle durch Änderung der Hammerspaltweite und der Umfangsgeschwindigkeit beeinflusst [60]. Die erste Aufgabe der Zerkleinerungstechnik besteht darin, durch einen geeigneten Beanspruchungsmechanismus dem Feststoff die Energie zuzuführen, die zur Ausbildung einer Bruchfläche und zur Trennung der Bruchstücke notwendig ist.

### 3.3.2. Partikelgrößenverteilung

Viele Merkmale von dispersen Schüttgütern hängen von der Korngröße und der Kornverteilung ab. Die Kenntnis der Korngröße und Kornverteilung ist ein extrem wichtiger Faktor bei der Produktionskontrolle und Qualitätssicherung. Treten Änderungen bei der Korngröße und der Kornverteilung auf, hat dies wesentlichen Einfluss auf die Produktqualität. Nur die ständige Kontrolle der Korngröße und Kornverteilung mit Hilfe der Korngrößenbestimmung ermöglicht eine Optimierung des Herstellungsprozesses und gewährleistet eine gleich bleibend hohe Qualität des Produktes.

### 3.4. Mehl- und Teigrheologie

#### 3.4.1. Theorie der Teigbereitung

Die Teigbereitung unterteilt sich in drei Phasen:

**Mischphase:** Dies beinhaltet das Mischen von Mehl, Wasser und der übrigen Teigzutaten. Die wasserlöslichen Bestandteile werden gelöst nachdem die Oberfläche der Feststoffteilchen benetzt wurde.

**Quellungsphase:** Das im Teig eingebrachte Wasser wird durch das Quellen und Einlagern über Klebereiweiß und den Pentosanen gebunden.

**Teigbildung:** Aufgrund der eingebrachten Knetenergie kommt es durch das Aufbrechen der SS-Brücken (~ 10 %) zur einer Auffaltung und Streckung der gequollenen Peptidketten. Diese strecken sich und gleiten übereinander. Dies führt zur Ausbildung neuer SS-Bindungen zwischen den Peptidketten. Dieses dreidimensionale Netzwerk wird Gluten (Kleber) genannt. Knetenergie, Teigeigenschaften und Gebäckvolumen hängen zusammen. Bei Jedem Teig durchläuft das Gebäckvolumen in Abhängigkeit der zugeführten Knetenergie ein Maximum, das bei einem kleberschwachen Mehl niedriger liegt als bei einem Kleberstarken. Durch Zusätze kann es zu einer Mehlerverbesserung kommen. Geht die Knetung über das Maximum hinaus, so wird der Teig feuchter und beginnt an der Wand des Knetbottichs zu kleben, das Gashaltevermögen lässt nach und eine Depolymerisierung wurde bewirkt.

#### 3.4.2. Teigstruktur und Teigentwicklung

Bei der Teigbildung hydratisiert das Protein und bildet zwischen den Stärkekörnern eine zähe Masse (Gluten). Diese Glutenbildung schafft die Grundlage für die Backfähigkeit des Weizens und die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten des Weizenmehles. Im Backprozess wird das im Teig angebotene Wasser mengenmäßig und zeitlich in Abhängigkeit von der Temperatur unterschiedlich gebunden und gehalten. Die Proteine werden bei erhöhter Temperatur denaturiert. Dabei wird das Wasser freigesetzt, das von der Stärke zum Quellen und Verkleistern aufgenommen wird. Die Pentosane ändern sich nicht und behalten ihren Wasseranteil gebunden. Der Gluten besteht aus zwei voneinander verschiedenen Proteingruppen, die als Gliadine und Glutenine bezeichnet werden. Über die Struktur von Glutenine sind verschiedene Hypothesen erarbeitet worden, wobei noch nicht endgültig geklärt werden konnte, welche die richtige These ist [61]. Nach Ewart entsteht Glutenine aus 50 Peptidketten, die zu einem großen Molekül

polymerisieren [62, 63]. Diese Hypothese wurde auch von anderen Autoren unterstützt [64, 65]. Es wird angenommen, dass Gliadine (Viskoelastizität) globuläre Proteine sind, welche durch intramolekulare SS-Bindungen stabilisiert werden. Die Tendenz zur weiteren Aggregation wird durch nicht kovalente Bindungen verursacht [66]. Über die Funktionalität der Glutenproteine existieren unterschiedliche Ansichten. Einige Autoren vertreten die Meinung, dass die Funktionalität der Glutenproteine nur von Glutenine (Festigkeit, Elastizität) abhängig ist und dass Gliadine bei der Glutenfunktionalität keine große Rolle spielen [67]. Andere Autoren schreiben auch den Gliadine eine größere Wirkung zu, da mit den Glutenine allein die Qualitätsunterschiede bei Weizen nicht erklärt werden können [68, 42]. Die Glutenfunktionalität wird auch durch Wechselwirkungen zwischen Proteinen und anderen Komponenten des Weizens, wie z. B. Stärke und Lipiden beeinflusst [69]. Die Weizenstärkekörner unterscheiden sich von Stärkekörnern anderer Getreidearten. Der Unterschied liegt in der besonderen Oberfläche der Weizenstärkekörner [70, 71]. Ein Modell, das die Struktur des Glutens und seiner Komponenten darstellt, zeigt die Abb. 3.10. Dabei bilden die Glutenine das Grundgerüst des Proteinnetzes, in das sich die Gliadine einfügen. Das Gliadine bildet die Verbindungsstellen zu den Gluteninemolekülen. Eine unmittelbare Berührung der Gluteninemoleküle untereinander wird dadurch unterbrochen. Die Einlagerung des Gliadines zwischen die Gluteninestränge vermindert die Festigkeit und Steifheit des Glutens [47].

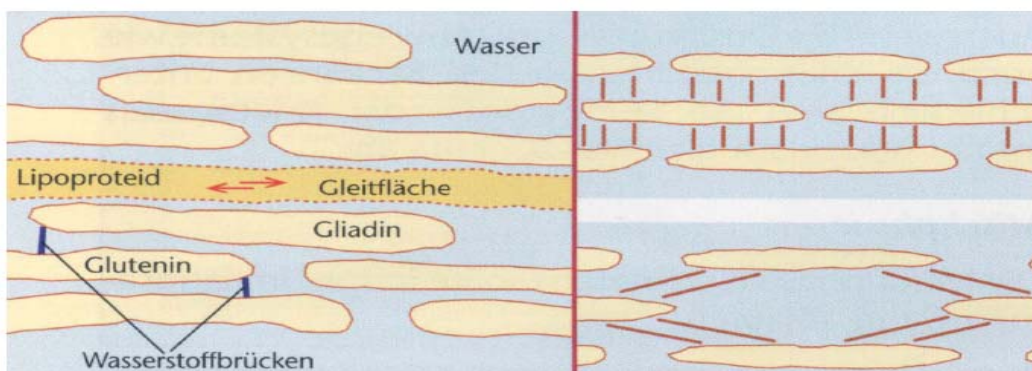


Abb. 3.10: Vorgänge bei der Kleberbildung [38]

Bestimmte Erkenntnisse unterstützen die Hypothese, dass die Stärke bei der Glutennetzentwicklung aktiv teilnimmt [70, 72]. Die Hypothese beruht teilweise auf den rheologischen Untersuchungen an Teigmodellen, welche über Mischungen aus Gluten und Stärke unterschiedlicher Getreidearten hergestellt wurden. Dabei wurden die rheologischen Eigenschaften der Modellteige wesentlich von der Variation der Weizenstärke beeinflusst [73]. Weiterhin wurden mit SDS-Lösung zwei Proteingruppen extrahiert, die wahrscheinlich mit der Stärkeoberfläche assoziieren und dadurch ein Teil des Stärkekorns sind. Anhand dessen wurde ein Modell von Nierle und Kersting erstellt, welches der Stärke eine größere Rolle bei der Teigentwicklung zuschreibt [74]. Neben der AMS-Zusammensetzung, der Molekulargewichtsverteilung und der Anzahl sowie Art der Bindungen werden die physikalischen Eigenschaften des Glutens von den Lipo- und Glykoproteinen beeinflusst.

Mit zunehmendem Molekulargewicht der Glutenine nimmt die Elastizität des Glutens zu, während bei Gliadine höhere Molekulargewichte zu einer Zunahme der Plastizität führen. Die Lipo- und Glykoproteine bewirken die Elastizität des Glutens durch hydrophobe Wechselwirkung bei der Ausbildung des Glutennetzwerks [42]. Schon in den vierziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde der Lipideinfluss auf die Glutenbildung untersucht [75]. Es ist bewiesen worden, dass Gluten auch mit Lipiden aggregiert [76, 77]. Die Lipid-Protein-Aggregation ist zudem reversibel [78].

Dabei wird der Gluten zu einem Polyphasensystem, bei welchem drei Arten von Wechselwirkungen auftreten: Protein-Protein, Lipid-Lipid und Lipid-Protein [79]. Die Prozesse bei der Teigbildung waren Gegenstand von Untersuchungen verschiedener Autoren. Graveland [80] untersuchte die Vorgänge in Gluteninefraktionen bei der Teigbildung. Er fand, dass die Glutenineteilchen mit den Stärkekörnern Cluster (traubenförmige Strukturen) bilden. Während des Knetens wird die ursprüngliche Struktur beschädigt, die festen Stärke-Protein-Cluster fallen auseinander, und die Proteinteilchen werden dissoziiert. Dabei strecken sich die Gluteninemolekülketten, und die Glutenine bilden mit den Gliadine ein geschlossenes Proteinnetz im Teig [80]. Hierbei werden die Gluteninemoleküle in kleinere Bruchstücke gespalten (Depolymerisation), so dass die Teigfestigkeit abnimmt. Die Teigruhe ermöglicht über die Ausbildung von SS-Brücken eine Repolymerisation [81, 82]. Durch diese Teigentwicklungsprozesse entwickelt sich eine quartäre Glutenstruktur. Die beiden Proteinfractionen (Gliadine und Glutenine) sind durch kovalente Bindungen, Wasserstoffbrücken, wie auch durch ionogene und hydrophobe Wechselwirkungen fest miteinander verbunden. Da die Bindungsart zwischen den AMS der Peptidketten eine große Rolle für die Funktionalität des Proteins spielt. Chemische Bindungen in den Proteinen unterteilen sich in kovalente und nichtkovalente Bindungen. Die kovalenten Bindungen kommen innerhalb der AMS, zwischen den AMS und als SS-Bindungen zwischen den Peptidketten vor.

Die Assoziationsenergie dieser Bindungen ist gegenüber den nichtkovalente Bindungen groß. Ionen-, Wasserstoffbrücken und van der Waals-Bindungen sind nichtkovalente Bindungen [83]. Seit Jahren wird angenommen, dass die Teigentwicklung durch die SS-Bindungen am meisten beeinflusst wird. Schon in den vierziger Jahren hat Sullivan [84] das erste Mal berichtet, dass die Thiol-Gruppen und SS-Bindungen für die Teigentwicklung verantwortlich sind. Später formulierten Frater et al. 1968 [85] die Hypothese, dass die Teigeigenschaften von Thiol-Gruppen und SS-Bindungen sowie deren Verhältnis zueinander abhängen. Neue Erkenntnisse schreiben dem Tyrosin eine große Rolle zu, welches regelmäßig in die Glutenine vorkommt [86]. Tilley et al 2001. [86] haben bewiesen, dass die Entwicklung der Tyrosin-Bindungen sowohl während der Knetung, als auch während des Backprozesses wichtig ist. Sie beeinflussen die Glutennetzentwicklung und deren Struktur. Einige Autoren haben versucht, über die Veränderung der Proteinlöslichkeit während der Teigherstellung Erkenntnisse über Teig- bzw. Glutenentwicklung zu gewinnen [87, 88].



Sie fanden, dass die Glutennetzentwicklung stark sortenspezifisch ist, was sich in den sortenabhängigen Veränderungen der Proteineigenschaften (verändertes Löslichkeitsvermögen eines Proteins in gleichem Lösungsmittel) widerspiegelt. Andererseits steigt die Löslichkeit in Essigsäure als Folge der Depolymerisation der Glutenine während der Knetung, und dies unabhängig von den Sorteneinflüssen [88]. Die Beschaffenheit der Glutenstruktur und damit des Teiges wird weitgehend durch die Molekulargewichtsverteilung und dem Verhältnis von Gliadine zu Glutenine bestimmt. Aggregations- bzw. Desaggregationsvorgänge in den Glutenmolekülen beeinflussen die Teigeigenschaften stark.

Durch Ab- bzw. Zunahme der Löslichkeit der Proteinuntereinheiten verändert sich das Verhältnis der Gliadine / Glutenine und infolgedessen ändern sich die rheologischen Eigenschaften des Glutens bzw. des Teiges. Des Weiteren wurde in mikroskopischen Untersuchungen beobachtet, dass sich im Augenblick des Wasserkontaktes aus Mehlpartikeln heraus Proteinfäden bilden, welche sich im Wasser ausbreiten [89, 90]. Daraus schloss Amend [91], dass in Mehlpartikeln das Protein in Form eines Gerüstwerkes aus Proteinsträngen vorliegt, in welchem die Stärkekörner eingebettet sind. Beim Anteigen werden die Mehlpartikeln immer wieder auseinandergepresst, gegeneinander bewegt und wieder zusammengepresst. Die adhäsiven zellulären Klebnetzwerke haften dabei immer stärker zusammen und es entsteht schließlich ein den gesamten Teig durchziehendes Klebnetz, das „aggregierte Klebnetzwerk“ [92].

### **3.4.3. Teigphysikalische Eigenschaften**

Es ist bekannt, dass die Wasseraufnahme, die Knetzeit und die Teigstabilität sowie der Dehnwiderstand und die Dehnbarkeit mit dem Proteingehalt sehr gut korrelieren [92]. Üblicherweise werden die physikalischen Eigenschaften eines Weizenteiges bzw. eines Mehl-Wasser-Systems mit rheologischen Messinstrumenten festgestellt. Dabei ist man bemüht, visko-elastische Eigenschaften der Teige zu beschreiben. Diese treten in Abhängigkeit von der Beanspruchungsart und den Beanspruchungsbedingungen als Stoffeigenschaft in Erscheinung. Eine Veränderung des Teigs sowie der Kleberbeschaffenheiten infolge der intensiveren Zerkleinerung soll damit untersucht werden. Das rheologische Verhalten eines Systems ermöglicht Rückschlüsse auf dessen Zusammensetzung und strukturellen Zustand.

#### **3.4.3.1. Knetversuche - Farinograph**

Die Qualität eines Mehles wird nur in beschränktem Maße durch seine chemischen Analysendaten charakterisiert, dafür viel mehr durch seine teigphysikalischen Eigenschaften. Diese können u. a. mit einem speziell dafür vorgesehenen Knetsystem, dem Farinographen, ermittelt werden. Mit diesem Knetter werden darüber hinaus über die Messung des Drehmoments die eingebrachte Energie und die Veränderungen der Konsistenz des Teiges kontinuierlich registriert. Ein so aufgezeichnetes Diagramm (Abb. 3.11) beschreibt die Entwicklung eines Teiges in Abhängigkeit von den Mehleigenschaften durch den Eintrag der mechanischen Energie sowie weitere Reaktionen als Funktion der Knetdauer bei einer konstanten

Knetgeschwindigkeit. [93, 94]. Die wichtigsten Merkmale aus dem Farinogramm sind die Wasseraufnahme die zur Erreichung einer Teigkonsistenz entsprechend 500 FE erforderlich ist. Die Untersuchung der Teigbildung mit dem Farinographen charakterisiert die einzelnen Phasen des Knetprozesse. Der Farinograph ist oft zur Beschreibung und Erklärung der Struktur der Teige mit Erfolg eingesetzt worden. In Veröffentlichungen wurde gezeigt, dass die rheologischen Eigenschaften eines Teiges vom Knetsystem

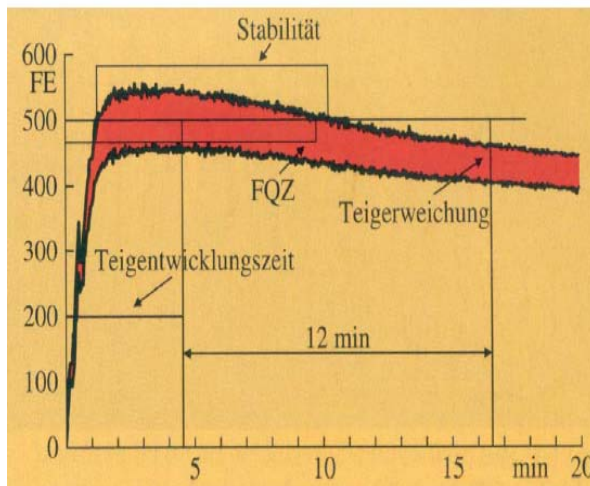


Abb. 3.11: Farinogrammskurve [38].

und der Dauer der Knetung abhängig sind. Bei der Anwendung einer schonenden Knetung über 15 und 25 Minuten wurde eine enge positive Korrelation zwischen Proteingehalt und Volumenausbeute der Gebäcke gefunden. Die Wasseraufnahme eines Mehles wurde wesentlich durch seine Inhaltsstoffe Protein, Pentosan und beschädigte Stärke bestimmt. Auch die Partikelfinheit hatte dabei eine Wirkung. Bei konstantem Gehalt an Protein kann die Wasseraufnahme über eine Steigerung des Anteils an beschädigter Stärke erhöht werden.

Die Wasseraufnahme korreliert mit der Stärkebeschädigung positiv. Es gibt jedoch Hinweise, dass je nach Mehilverfahren und Getreidearten die Wasseraufnahme unterschiedlich sein kann [95]. Die durch den Vermahlungsvorgang auf die im Farinographen gemessenen Parameter (WA, TEZ, TST, TER) eines Mehles wirken, beschränken sich nicht allein auf die Stärkebeschädigung. Auch die Proteinkomponente und Pentosanegehalt kann verändert werden, z. B. durch oxidative Einflüsse. Andererseits ist auch eine Schädigung des Proteins durch Schereffekte denkbar [96]. Von der aufgezeichneten Kurve wertet man nach folgenden Aspekten aus: Prozentuale Menge an Wasser, die der Teig bis zur vollen Ausbildung bei einer Konsistenz von 500 FE.

Das Wasseraufnahmevermögen eines Mehles ist abhängig vom Ausmahlungsgrad, dem quantitativen und qualitativen Anteil der Mehlinhaltsstoffe, dem Feuchtanteil und der Temperatur. Es wurde gezeigt, dass sowohl die Proteinzusammensetzung als auch die Eigenschaften der Proteine das Verhalten der Teige während des Knetens beeinflussen. Je höher der Gehalt an Glutenine im Mehl, desto länger war die Teigentwicklungszeit [97]. Es wurde weiterhin beobachtet, dass die Knettoleranz bzw. die Teigstabilität vom Verhältnis der kovalenten (SS-Bindungen) und nicht kovalenten (Wasserstoffbrücken) im entwickelten Glutennetz abhängig ist [98]. Die Teigentwicklungszeit ist stark beeinflusst vom Verhältnis Glutenine-Gliadine. Sowohl der Anstieg des Proteingehaltes bei einem konstanten Glutenine / Gliadine Verhältnis, als auch der Anstieg des Glutenine-Gliadine -Verhältnisses bei einem konstanten Proteingehalt im Mehl verlängerten die Teigentwicklungszeit [99].

Allgemein ist zu sagen, dass sich farinographische Untersuchungen auf die Wasseraufnahmefähigkeit und die Kneteigenschaften des eingesetzten Mehles beziehen.

### 3.4.3.2. Dehnungsmessungen – Extensograph

Das Extensogramm gibt Auskunft über die Dehnungseigenschaften des Teiges, sein Verhalten auf Gare und über das zu erwartende Gebäckvolumen. Extensographen liefern wichtige Anhaltspunkte für die

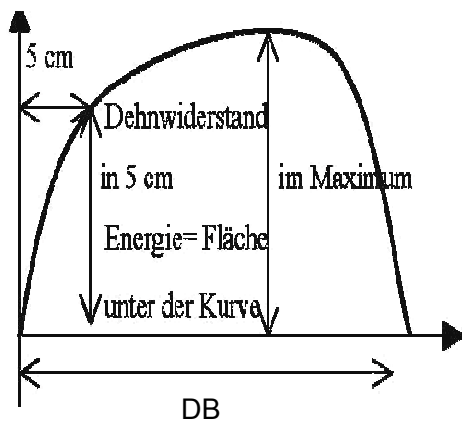


Abb. 3.1: Extensographskurve

Verarbeitungs- und Backeigenschaften eines Mehles bzw. eines daraus hergestellten Teiges. Unter definierten Bedingungen werden Teigstränge unterschiedlicher Reifestadien einer einfachen Deformation unterzogen, d. h. sie werden bis zum Zerreißen gedehnt. Die visko-elastischen Eigenschaften der Teige können durch Dehnungsversuche mit dem Brabender-Extensographen beschrieben werden.

Hierbei wird ein in einem externen Knetter hergestellter und vorbereiteter Teig einem Zug-Dehnungs-Versuch unterzogen und seine visko-elastischen Eigenschaften in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Extensogramm wiedergegeben [94]. Diese Methode sieht vor, die Bereitung der Teige für die Messung mit der Zugabe von destilliertem Wasser und von Na Cl vorzunehmen. Als Messergebnis wurden die Extensogramme nach 45, 90 und 145 min Ruhezeit ausgewertet.

Dies ist für das Messergebnis relevant, da die durch Knetung und Formung im Teig entstandene Spannung erst nach 45 Minuten so weit abgeklungen ist. Daher eignet sich die Methode Extensogramme durch komplexe Betrachtung der Charakteristika der Dehnungskurven zur Beurteilung der Teige besser, als die Bewertung nur einzelner Messdaten [100]. Die Deformation der Teige erfolgt im Extensograph durch eine uniaxiale Dehnung eines Teigstranges [94]. Als Messergebnis werden Dehnungskurven erhalten, deren Auswertung nach analogen Prinzipien erfolgt.

Den Kurven ist zunächst der Dehnwiderstand (DW bei 5 cm bzw. im Maximum beim Extensogramm) zu entnehmen. Sie können die Festigkeit oder Steifheit des Teiges beschreiben und als elastische Komponente seiner viskoelastischen Eigenschaften angesehen werden. Die Dehnbarkeit der Teige wird in der Kurve mit der Länge (DB im Extensogramm) angezeigt. Demzufolge wird das viskoelastische Verformungsverhalten des Teiges am deutlichsten mit der Verhältniszahl DW/DB angezeigt (VZ-Wert). Die Deformationsarbeit wird aus der Fläche unter der Kurve ermittelt.

Eine gute Mehqualität wird im Allgemeinen durch hohe Werte für Energie bei optimalen Verhältniszahlen beschrieben. Ungeachtet der kritischen Anmerkungen hat die Methode der Getreidewissenschaft und Praxis gute Dienste geleistet. In Veröffentlichungen wurde berichtet, dass die viskoelastischen Eigenschaften der Teige, angezeigt durch die Verhältniszahl aus Elastizität und Dehnbarkeit, sowohl von Typ und Menge der Glutenineinheiten, als auch von Typ und Menge der Gliadine abhängig sind [42]. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Glutenineanteil im Protein des Mehles den Dehnwiderstand und die Dehnbarkeit des Teiges beeinflusst [101]. Die Dehnbarkeit eines Teiges, insbesondere nach längerer Teigruhe von 90 bzw. 135 min, korreliert besser mit dem Gluteninegehalt im Mehl als mit dem Gluteninegehalt im Gluten. Dahingegen korreliert der Dehnwiderstand besser mit dem Gluteninegehalt im Gluten als mit dem Gluteninegehalt im Mehl [94]. Die rheologischen Eigenschaften von Teigen und das Backverhalten reagieren sehr empfindlich auf Veränderungen des im Mehl existierenden Redoxsystems. Reduktionsmittel wie Glutathion führen zu weicheren Teigen, Oxidationsmittel wie Kaliumbromat oder Luftsauerstoff bewirken eine Verfestigung der Teige. Als Ursache hierfür werden Veränderungen in der Thiol-Disulfid-Struktur der Kleberproteine vermutet.

Durch die Oxidationen von Mehlen wurden niedrigere Thiolgehalte in den Mehlen festgestellt. So wiesen unter Stickstoff ermahlene Mehle höhere Thiolgehalte im Vergleich zu unter Luftsauerstoff ermahlenden Mehlen auf [94]. Lagudah und Mitarbeiter [102] haben dagegen keinen Einfluss von Gliadine auf die rheologischen Eigenschaften der Teige gefunden. Bei einem konstanten Glutenine-Gliadine-Verhältnis bewirkte ein zunehmender Proteingehalt einen Anstieg des Dehnwiderstandes und der Dehnbarkeit der Teige im Extensogramm. Ein Anstieg des Glutenine-Gliadine-Verhältnisses bei konstantem Proteingehalt wirkt in gleicher Weise [99]. Wooding [103] berichtet, dass mit dem Anstieg der Teigentwicklungszeit (im Farinogramm) auch der Dehnwiderstand (im Extensogramm) steigt.

#### **3.4.3.3. Verkleisterungseigenschaften und Viskositätsverhalten**

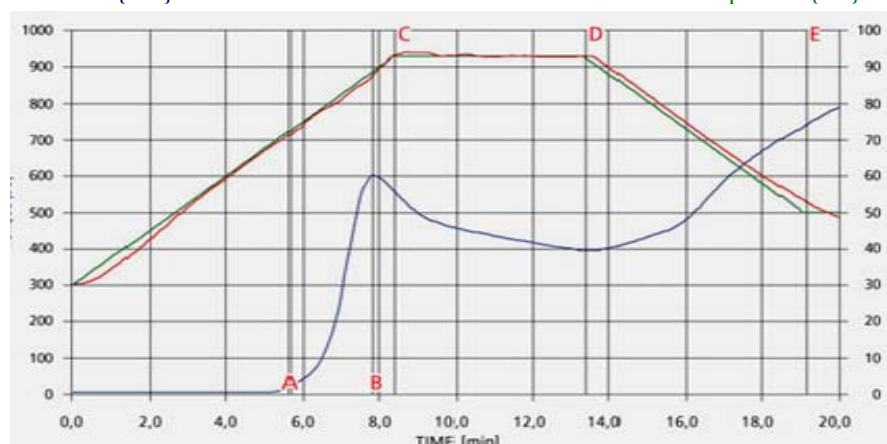
Die Backeigenschaften beruhen weitgehend auf der Verkleisterung der Stärke und der Enzymaktivität der  $\alpha$ -Amylase im Mehl. Der Temperaturanstieg in dem Mehl-Wasser-Gemisch ist in etwa vergleichbar mit dem Temperaturverlauf im Inneren der Brotkrume während des Backens. Die Micro Visco-Amylo-Graph-Analytik lässt daher Rückschlüsse auf die Backeigenschaften des Mehles zu.

Damit wird das Viskositätsverhalten einer Mehl-Wasser-Suspension bei determinierter Erwärmung der Suspension und stattfindender Verkleisterung der Stärke bestimmt.

Im Verlauf der Messung finden deutliche Veränderungen des Viskositätsverhaltens der Stärke statt, die einerseits von der Menge und der Beschaffenheit der Stärke, andererseits von der Aktivität der stärkeabbauenden Enzyme beeinflusst werden. Der Stärkeverkleisterungsverlauf findet wie in Abb. 3.13 dargestellt statt:

Viskosität {BE}

Temperatur {°C}



Punkt	Name
A	Verkleisterungsbeginn
B	Maximale Viskosität
C	Start der Haltezeit
D	Start der Kühlzeit
E	Ende der Kühlzeit

Abb. 3.2: Verkleisterungsprozess der Stärkekörner

Die Verkleisterungseigenschaften der Stärke, wie Verkleisterungsbeginn und -maximum, die Temperaturstabilität und die Dickungseigenschaften lassen sich mit dem MVAG reproduzierbar bei nativen und modifizierten Ausgangsprodukten ermitteln. Damit können kontinuierlich die Veränderungen des Viskositätsverhaltens einer Mehl-Wasser-Aufschlammung während des Aufheizens gemessen werden.

Der ansteigende Viskositätslevel im Auswertediagramm ist das Ergebnis aus der Viskositätszunahme durch die Verkleisterung und der gleichzeitige Verflüssigung durch die Amylasen.

Beim Erwärmen wird ein Temperaturanstieg gewählt, der dem Backprozess gleicht, so dass im MVAG wichtige Aussagen über die Backeigenschaften gewonnen werden können. Im Gegensatz zum Amylograph können die Messungen der Verkleisterungseigenschaften von Stärke und stärkehaltigen Produkten mit einer zusätzlichen Kühlmöglichkeit festgestellt werden. Ein vom Anwender jeweils festgelegtes Temperaturprofil sorgt dafür, dass eine Suspension von Wasser und Stärke aufgeheizt und anschließend wieder abgekühlt wird. Die Viskosität wird während des gesamten Temperaturprogramms gemessen und über der Zeit und der Temperatur aufgetragen.

### 3.5. Dynamische Teig rheologie

Im Laufe des Jahrhunderts haben sich die Bäcker, Getreidewissenschaftler und Getreideforscher für das Verstehen und Messen der grundsätzlichen mechanischen Eigenschaften von Weizenmehlteig interessiert. Das Verarbeitungsverhalten der Teige ist rohstoff- und prozessabhängig und wird mit Hilfe rheologischer Kennwerte charakterisiert. Insbesondere die Anwendung der mechanischen Energie oder Arbeit führt zur Änderung seines viskoelastischen Verhaltens. Die Überschreitung oder Absenkung unter optimale technologische Werte kann die Qualität der Produkte beeinflussen.

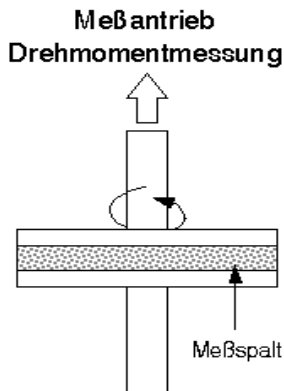
#### 3.5.1. Rheologische Grundlagen

Die Lebensmittelrheologie befasst sich mit den speziellen physikalischen Eigenschaften der Lebensmittel wie Festigkeit, Viskosität, Elastizität und Plastizität, die auf dem Deformationsverhalten beruhen und in der

Regel durch die Abweichung vom idealelastischen/ idealviskosen Verhalten gekennzeichnet sind. Die Ermittlung dieser Eigenschaften, die sich u. a. aus dem strukturellen Aufbau ableiten, ist sowohl für die Bewertung der Qualität als auch für das Verhalten in Grundoperationen der Lebensmittelverfahrenstechnik von großer Bedeutung, da sich Fließ-, Transport-, Lager- und Verarbeitungsverhalten ableiten lassen. Arbeitsgebiete der Rheologie sind die Makro-, Mikro- und Texturrheologie. Die Makrorheologie untersucht die Zusammenhänge  $\tau = f(\gamma, \dot{\gamma})$  als Einwirken äußerer anisotroper Kräfte. Das Spannungs- und Deformationsverhalten wird durch rheologische Zustandsgleichungen, die charakteristische Stoffwerte enthalten und durch mechanische Analogiemodelle beschrieben. Die makrorheologischen Gesetze sind zur Berechnung von strömungstechnischen oder Formgebungsprozessen geeignet und deshalb von grundlegender Bedeutung. Mit Hilfe der Makrorheologie können nicht die Ursachen des Deformationsverhaltens und damit auch nicht die Möglichkeiten zu deren Beeinflussung erkannt werden. Ursache von Strukturierungen sind Bindungsarten chemischer und physikalischer Natur. [94]

### 3.5.2. Rheologische Meßsysteme für Teige

Rheometer dienen der Durchführung von Scher- und Oszillationsmessungen in einem weiten Scherraten- und Temperaturbereich. Mit Hilfe der Oszillationsmessungen können Strukturuntersuchungen durchgeführt werden. Teige können sinnvoll in Platte-Platte-Meßsystemen vermessen werden. Bei dem Meßsystem aus



zwei gegenüberliegenden Platten lässt sich eine Platte einer oszillierenden Bewegung unterwerfen, wobei sich die Geschwindigkeit der Platte sinusartig mit der Zeit verändert.

Eine im Spalt zwischen den Platten befindliche Substanz bekommt von der Erregerplatte ein je nach Frequenz und Amplitude oszillierend veränderliche Deformation bzw. Frequenz.

Im Gegensatz zum Kegel-Platte-System ist die Schergeschwindigkeit nicht im gesamten Spalt gleich.

Abb. 3.3: Platte-Platte-Meßsystem (schematische Darstellung einer Schermessung)

Vielmehr steigt sie mit dem Radius an und erreicht ihr Maximum am äußeren Rand. Als charakteristische Scherrate wird jene am äußeren Rand herangezogen. Die Gleichungen für PP-Meßsystem DIN 53018 werden wie folgt berechnet [104]. Plattenabstand soll  $\ll$  als Plattenradius sein „ $h \ll R$ “

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (3.1)$$

$$F = \frac{M}{R} \quad (3.2)$$

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (3.3)$$

$$\tau(R) = \frac{2 \cdot M}{\pi \cdot R^3} = G_P \cdot M \quad (3.4)$$

$$\dot{\gamma}(R) = \frac{v}{h} = \frac{\omega \cdot R}{h} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M \cdot R}{h} \quad (3.5)$$

Ein größerer Plattenradius und eine geringere Spalthöhe erhöhen die Meßempfindlichkeit.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{2 \cdot M}{\pi \cdot R^3} \cdot \frac{h}{\omega \cdot R} = \frac{2 \cdot M \cdot h}{\pi \cdot R^4 \cdot \omega} \quad (3.6)$$

### 3.5.3. Oszillationstest

Durch die Oszillationsmessungen sind die Möglichkeiten eröffnet worden, das Strukturverhalten eines Stoffes in einem Frequenzversuch (bei konstanter Amplitude jedoch definiert steigender Frequenz) oder in einem Deformationsversuch (bei konstanter Frequenz und definiert steigender Amplitude) darzustellen, wobei diese in Abhängigkeit von der Belastung eine Substruktur im zu messenden Stoff während der Messung aufbauen. Durch eine oszillierende Scherbeanspruchung können elastische und viskose Materialeigenschaften gleichzeitig erfasst werden. Für eine zerstörungsfreie Messung ist es notwendig, die Oszillation im Rahmen des LVB  $\gamma < \gamma_{\text{krit}}$  durchzuführen.

Der native Strukturierungszustand eines Materials wird in einem Deformationsversuch (**Amplitudensweep**) oder in einem Frequenzversuch (**Frequenzsweep**) beschrieben. Der Deformationsversuch wird angewandt, um ein lineares viskoelastisches Verhalten zu registrieren, wobei die rheologischen Eigenschaften von den Beanspruchungen nicht abhängig sind. Der Frequenzversuch zeigt, in welcher Weise sich viskoses bzw. elastisches Verhalten mit der Häufigkeit der Beanspruchung ändern. Von dynamischen Moduli spricht man, wenn die Spannung oder Dehnung als Funktion der Zeit nicht konstant sind (siehe Abb. 3.15) [94]. Bei der Oszillationsmessung wird als Funktion der Zeit ein sinusförmiger Spannungs- oder Deformationsverlauf durch den Messkörper auf die Substanz übertragen. Dabei macht sich das Relaxationsverhalten eines viskoelastischen Stoffes in einer Phasenverschiebung  $\delta$  zwischen Spannung und Deformation bemerkbar.

Dabei gilt definitionsgemäß:

- für rein elastische Stoffe  $\delta = 0^\circ$
- für rein viskose Stoffe  $\delta = -90^\circ$
- für viskoelastische Stoffe  $0^\circ < \delta < -90^\circ$

Das Material wird meist einer sinusförmigen Deformation mit kleiner Amplitude ausgesetzt. Die kleine Amplitude garantiert dabei die Messung im LVB.

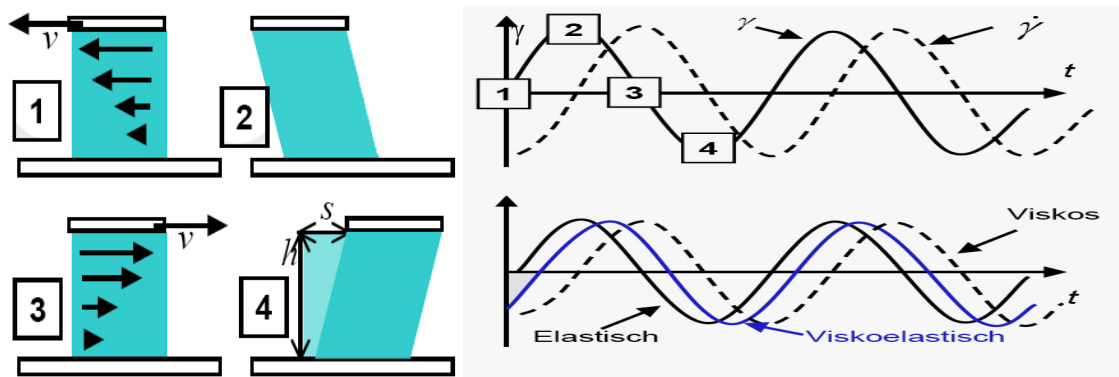


Abb. 3.4: Sinusförmige Deformationsvorgabe mit dynamischer Beanspruchung

In der Abb. 3.15 ist das Messprinzip dargestellt. Die Probe wird ausgehend vom Ausgangszustand (1) bis zu einer maximalen Auslenkung  $S_{\max}$  entsprechend einer maximalen Deformation verschert (Punkt 2). Danach setzt die Gegenbewegung ein, wobei die höchste Geschwindigkeit am Punkt 3 erhalten wird. Am Punkt 4 erfolgt dann die erneute Umkehrung der Bewegung. Die Deformation wird durch eine Sinusfunktion beschrieben, die durch die zwei Parameter Amplitude und Kreisfrequenz charakterisiert ist. Der Speichermodul  $G'$  ist ein Maß für die reversibel, elastisch im Stoff gespeicherte Deformationsenergie (= elastischer Anteil), während der Verlustmodul  $G''$  der durch Fließen irreversibel dissipierten Energie proportional ist (= viskoser Anteil).

$$G'(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad (3.7)$$

$$G''(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad (3.8)$$

Das Verhältnis von Speichermodul zu Verlustmodul ist durch den Verlustfaktor  $\tan \delta$  gegeben.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (3.9)$$

Das viskoelastische Verhalten kann am Beispiel der viskoelastischen Flüssigkeit mit Hilfe der Maxwell-

Gleichung

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\eta} \quad (3.10)$$

beschrieben werden. Die Gleichung nach Kelvin-Voigt beschreibt das Verhalten von viskoelastischen Festkörpern.

$$\tau = G \cdot \gamma + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3.11)$$

Ein typischer Verlauf der Module als Funktion von Frequenz und Amplitude wird in Abb. 3.16 dargestellt. Derartige Amplituden- und Frequenzversuche sind durchgeführt worden, um den Einfluss der Handelsqualität und des Proteingehalts auf das Strukturverhalten der Weizenteige zu ermitteln.



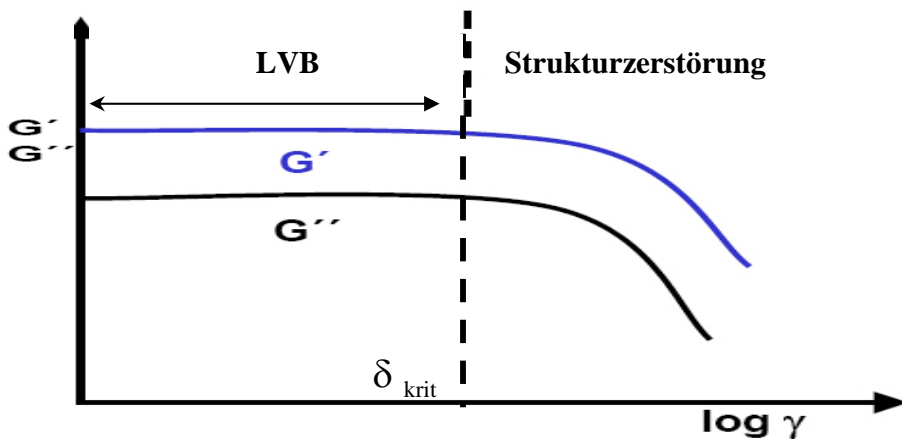


Abb. 3.5: AS-Messung Typische Verläufe von Speicher- und Verlustmodul

Gluten und die wasserlöslichen Komponenten der Weizenproteine beeinflussen ebenfalls die Eigenschaften der Teige. Mit der Zugabe von wasserlöslichen Proteinen steigen die  $G'$ - und  $G''$ -Werte an [105]. Dabei wurde festgestellt, dass Gluten von starker elastischer Struktur höhere Werte für  $G'$  und  $G''$  aufweist als Gluten von schwacher und dehnbarer Struktur. Außerdem wurde beobachtet, dass die  $G'$ - und  $G''$ -Werte des Glutenins wesentlich höher lagen als die des Gliadins. Die  $G'$ - und  $G''$ -Werte des Glutens lagen jeweils intermediär zwischen den Werten seiner Komponenten Glutenine und Gliadine. Genutzt werden der Amplitudensweep (AS), der Frequenzsweep (FS) und der Temperatursweep (TMS).

### 3.5.3.1. Auswertungsmethoden

Um eine mathematische Formalisierung der Messdaten aus den Grafiken zu ermitteln, werden Regressionsgleichungen im Auswertebereich der jeweiligen Kurven des Frequenzsweepes regressiert. Dabei wurde mit folgenden Gleichungsansätzen für den Definitionsbereich von  $0,1 \leq f \leq 10$  gearbeitet [106].

$$G'(f) = G'_{1\text{Hz}} \cdot f^x \text{ bzw. } G''(f) = G''_{1\text{Hz}} \cdot f^y \quad (3.12)$$

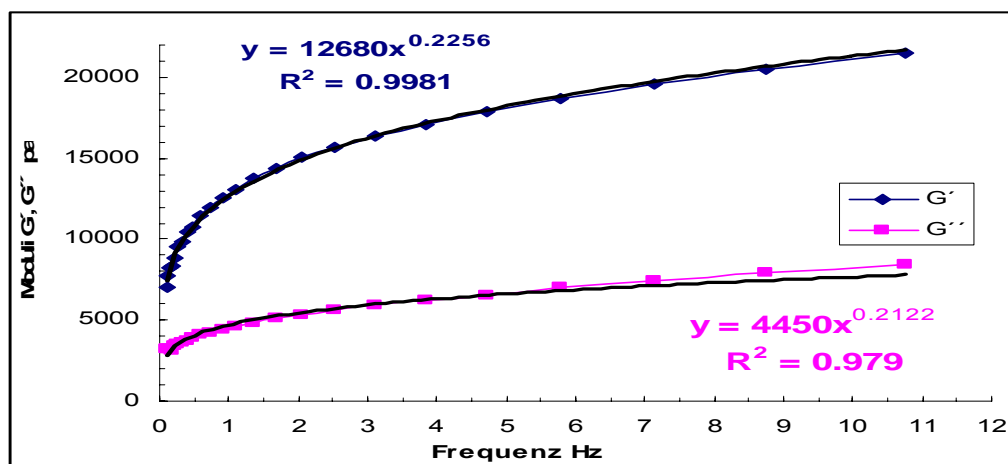


Abb. 3.6: Auswertung mittels Regressionsgleichungen

Wie in der Abb. 3.17 zu sehen, weisen die verwendeten Potenzansätze höchste Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) für  $G''$  (unten) und  $G'$  (oben) auf. Dabei entspricht der Exponent dem Maß der frequenzabhängigen Strukturstabilität bzw. dem Strukturbildungsmechanismus im Messbereich  $0,1 \leq f \leq 10$  Hz. Je größer der Wert für den Exponenten, desto steiler ist der Anstieg und der frequenzabhängige Aufbau der Struktur. Damit stellen  $x$  und  $y$  die Exponenten des Strukturbildungsmechanismus dar.

Der Koeffizient gibt Auskunft über die Abweichung vom Verhalten einer klassischen Gelstruktur mit  $x \rightarrow 0$  bzw.  $y \rightarrow 0$  des Speicher- und Verlustmoduls.

### 3.5.4. Kriech- und Kriecherholungsversuche

Viskosität und Elastizität sind zwei Eigenschaften einer Substanz, die als Reaktion auf einwirkende Normal- oder Schubspannungen am Beispiel einer Einpunktmessung mit Hilfe des Kriechversuches ermittelt werden können. [107]. In der Abb. 3.18 ist die Schubspannungsvorgabe (Kriech- und Kriecherholungsphasen) und die Materialantwort über der Zeit dargestellt. Man unterscheidet in die Belastungs- und die Kriecherholungsphase.

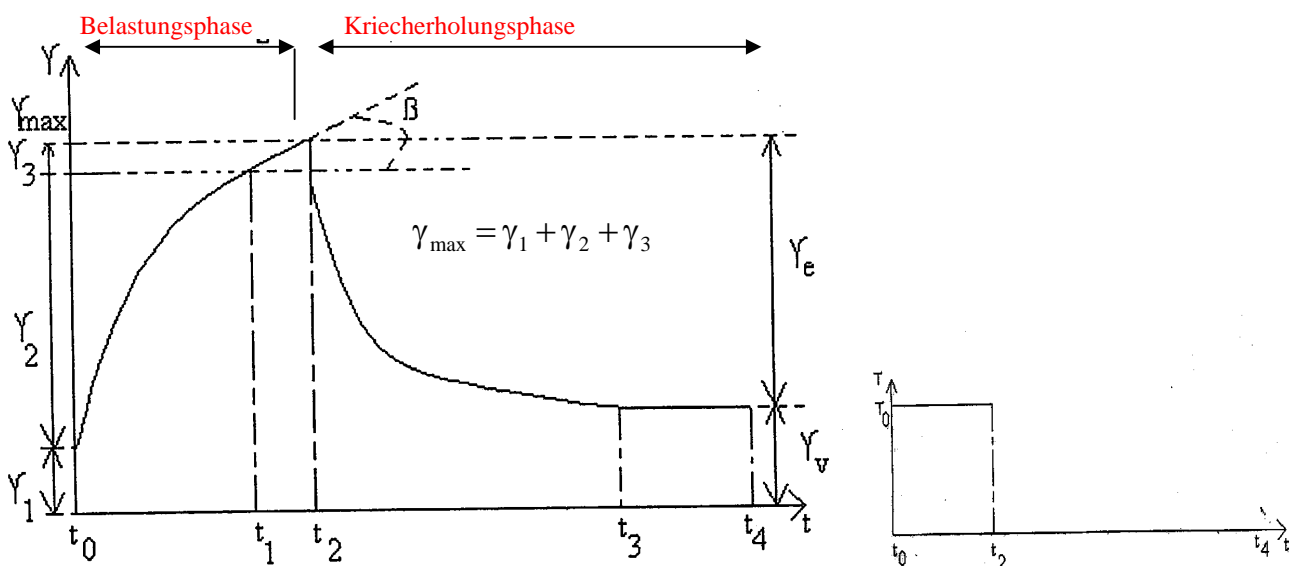


Abb. 3.7: Kriechversuch [106]

Mit dieser Untersuchung ist es möglich, die resultierende Beanspruchung in zwei Phasen zu teilen:

1. Belastungsphase (Deformationsphase, Kriechkurve) mit konstanter Schubspannung
  - sofortige zeitunabhängige elastische Deformation mit  $t = 0$ .
  - Instationäres Fließen in der Belastungsphase zwischen  $t_0$  und  $t_1$ .
  - Stationäres viskoses Fließen zwischen  $t_1$  und  $t_2$ .

Die Gesamtgleichung für den Verlauf der Deformationskurve während der Belastungsphase lautet [104]:

$$\gamma(t) = \gamma_1 + \gamma_2(t) + \gamma_3(t) = \frac{\tau_0}{G_1} + \frac{\tau_0}{G_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}\right) + \frac{\tau_0 \cdot t}{\eta_0} \quad (3.13)$$

## 2. Entlastungsphase (Rückdeformationsphase, Kriecherholungskurve)

- sofortige zeitunabhängige elastische Rückstellung mit  $t = 0$ .
- Instationäres Fließen in der Entlastungsphase zwischen  $t_2$  und  $t_3$ . Die Substanz stellt sich um den Wert  $\gamma_e$  zurück.
- Die stationäre Endkurve liegt mit Erreichen von  $t_3$  vor.  $\gamma_v$  ist definiert. Die Gleichung der Kriecherholungskurve ist in 3.14 definiert.

$$\gamma(t) = \gamma_{\max} - \frac{\tau_0}{G_1} - \frac{\tau_0}{G_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}\right) \quad (3.14)$$

Am Ende bleibt ein konstanter Endwert  $\gamma_v$  der Verformung zurück. Dieser Anteil der Deformationsenergie geht als Reibungswärme an die Umgebung verloren (irreversible Prozess) und charakterisiert den viskosen Anteil. Aus den Versuchsdaten könne folgende rheologische Parameter ermittelt werden:

$$\eta_0 = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_3} \quad (3.15)$$

Der Ruhescherviskosität charakterisiert des Fließverhaltens am Ende der Belastungsphase und wird bei kleiner Scherrate gemessen, hohe Werte der Ruhescherviskosität entsprechen geringerer Fließfähigkeit des Materials [128].

$$\dot{\gamma}_3 = \frac{\gamma_3}{t_2 - t_1} \quad (3.16)$$

Das Kriechkomplianz charakterisiert die Fließfähigkeit und elastische Eigenschaften des Materials in Abhängigkeit von der Zeit

$$J_e(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau_0} \quad (3.17)$$

Der Ruheschubmodul ist eine Kennzahl für die elastische Verformbarkeit einer Substanz bei kleinster Scherung, also bei Strukturhalt. Er berechnet sich als Quotient der vorgegebenen Spannung zum wieder gewinnbaren elastischen Anteil.

$$G_0 = \frac{1}{J_e} \quad (3.18)$$

Ein weiterer Kennwert aus den Kriechversuchen ist die Relaxationszeit:

$$\lambda = \frac{\eta}{G_0} \quad (3.19)$$

Im Vergleich zu Oszillationsmessungen stellen Kriechversuche Einpunktmessungen dar. Die Methode besitzt gerade bei der Teigcharakterisierung als einfach zu handelnde Schiedsmethode Bedeutung, siehe auch Kapitel 7 und 8.

### 3.6. Schlussfolgerungen aus der Literaturrecherche

Als Resümee der Literaturlauswertung stellt sich heraus, dass das Proteinpotenzial von Weizen und Legumionosen am Beispiel des Kichererbsenmehlansatzes sich aus ernährungsphysiologischer, nutritiver Sicht nahezu ideal ergänzt (Cystein und Methionin als schwefelhaltige essenzielle Aminosäure werden angereichert). Der Umsetzung der Konzeption der Anreicherung von Weizenmehlproteinen mit Eiweißen aus Leguminosen stehen backtechnische Bedenken gegenüber. Beim notwendigen Einteigprozess liefert die Protein-/Stärkezusammensetzung des Weizens einen als vergleichsweise ideal zu verarbeitenden Teig als vorrangige Protein-Wasser-Interaktion. Es entsteht ein **viskoelastisches** System mit bekannten stabilen Verarbeitungseigenschaften. Die Zumischung eines nicht primär kompatiblen Eiweißkomponents verhindert die Ausbildung eines bekannten viskoelastischen Systems auf Basis Gluteninteraktionen in der Matrix.

Weiter sind Veränderungen in der sensorischen Akzeptanz in Abhängigkeit vom Zumischungsverhältnis zu erwarten, dto. bei Krume, Porung usw.

Ein kritisches Zumischungsverhältnis des Kichererbsenmehles ist zu erwarten und mit ca. 30 % aus backtechnischer Sicht und sensorischen Tests zu bestätigen. Sämtliche konventionellen und modernen teigrheologischen Messverfahren können als spezifische Kontroll- bzw. Vergleichsverfahren genutzt werden. Da die Ergebnisse moderne rheologische Messverfahren in der Literatur nicht umfangreich beschrieben werden, ist ein besonderer Schwerpunkt auf die Anwendung / Ergebnisse der Oszillationsmessungen und deren verallgemeinerungsfähigen Messvorgaben zu legen.

## 4. Material und Methoden

Zur Reproduzierbarkeit der Untersuchungen werden nachfolgend die eingesetzten Produkte und Methoden aufgeführt.

### 4.1. Versuchsmaterialien

Für die Produktentwicklung wurden Mischungen aus handelsüblichen Typenmehlen (Weizenmehl Typ 405 Marktkette Lidl) und Mahlprodukten aus Kichererbsen (Sorte Kabuli) aus der Türkei in unterschiedlichen Anteilen in den Rohstoffmischungen kombiniert und verwendet.

#### 4.1.1. Bestimmung des Hektolitergewichts

Das Hektolitergewicht gilt als Indikator für die Mehlausbeute. Zur Bestimmung wurde die Masse des Getreides in einer ¼ L Getreideprobe ermittelt und anhand der Vergleichstafeln berechnet [108]. Das Hektolitergewicht von Kichererbsen beträgt 67,18kg /hl (Doppelbestimmung) und von Weizen 78,00 kg/hl.

#### 4.1.2. Bestimmung der Tausendkornmasse

Die Tausendkornmasse (TKM) ist die feuchtfreie Masse von tausend unbeschädigten Körnern einer repräsentativen Getreideprobe und wurde durch manuelles Auszählen und Masseermittlung von zweimal 500 Körnern bestimmt. Nach der Entfernung der Schmachtkörner mit 0,43 % von der Probe wurden zweimal 500 Körner gezählt und eingewogen: TKM der Kichererbsen betrug 374,5 g. Weizen 40 – 65 g

## 4.2. Technischer Versuchsablauf (Prozessführung)

### 4.2.1. Benetzung

Die Kichererbsen weisen eine Ausgangsfeuchte von 8,1 % auf. Vor der Zerkleinerung der sauberen Versuchskichererbsen in der Hammermühle ist der Feuchtegehalt von Kichererbsen durch Benetzen mit Wasser bei Raumtemperatur in einem geschlossenen Behälter innerhalb von 24 Stunden auf die erforderliche Vermahlungsfeuchte 12 % erhöht worden. Die benetzten Kichererbsen wurden für die Vermahlungen in der Hammermühle in Chargen zu 2 kg abgewogen. Die Berechnung der erforderlichen Wassermenge erfolgte nach Gleichung

$$m_w = \frac{FA_2 - FA_1}{100 - FA_2} \cdot m_{KE} = \frac{12,0 - 8,1}{100 - 12} \cdot 2 = 0,089 \text{ kg} \quad (4.1)$$

Die Erweichung oder Benetzung ist der Hauptschritt bei Überführung der Kichererbsen oder anderen Hülsenfrüchte in die prozessierbare Form. Wenn das Korn mit Wasser benetzt wird, bildet sich eine Filmschicht auf der Oberfläche des Korns aus. Wassermoleküle durchbrechen den Widerstand der Filmschicht und durchdringen die Samenschale, um in die Keimblätter zu gelangen. Hauptsächlich dient die Wasseraufnahme der Erweichung der Kichererbsenschale. [25]. Infolge der Wasseraufnahme quellen die Körner und es kommt zu einer Verbesserung des Zerkleinerungsverhaltens. Als Mechanismen des

Wassertransports können vorliegen: Kapillartransport im vorhandenen Leitsystem von Makro- und Mikrokapillaren und Diffusion.

#### 4.2.2. Mahlen

Die auf 12 % Feuchtegehalt genetzten Kichererbsen wurden in einer Hammermühle mit eingesetzter Siebbahn von 1200  $\mu\text{m}$  und einer Drehzahl von 4263 U/min vermahlen. Aufgrund der härteren Struktur der Kichererbsen und der damit erforderlichen intensiveren Prallarbeit wurde der Durchsatz auf 13,5 kg/h festgelegt, da eine steigende Produktmenge in der Mühle einen Anstieg der Mehltemperatur bewirkte, siehe auch [109]. Infolge der niedrigen Dosierung wurde eine Temperatur des Mehles unterhalb von 30 °C erreicht.

#### 4.2.3. Partikelgrößenbestimmung mittels Laserpartikelanalytik

Zur Ermittlung der Korngrößenverteilung der Mehle sowie der Mehlfraktionen wurde ein Zähl- oder Streulichtmessverfahren eingesetzt. Die Messung der Korngrößenverteilung erfolgte im Laser-Streulichtspektrometer „HORIBA LA-950“ der Firma Retsch, auf der Grundlage der statischen Laserlichtstreuung, gemäß DIN/ISO 13320. Bei der Beugung des Laserstrahls durch die Feststoffteilchen entsteht das Fraunhofersche Beugungsspektrum, welches durch eine Linse auf einen Schirm projiziert und abgetastet wird. [110]



Abb. 4.1: Partikelgrößenanalysator HORIBA LA-950 Retsch [110]

Die entstehenden Beugungsringe, deren Lichtintensität und Streuwinkel sind zur Partikelgröße proportional. Durch eine computergestützte Datenverarbeitung erfolgt eine statistische Analyse der Korngrößenverteilung, der Volumenanteile sowie der spezifischen Oberfläche der Probe. Die wichtigsten Kennwerte zur Charakterisierung der Korngrößenverteilung sind:  $d_{10}$ , Median  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  und die spezifische Oberfläche. Verwendet wird der Pulvermessmodul im Druckluftbetrieb 0.3 MPa.

#### 4.3. Analytische Methoden

##### 4.3.1. Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts

Der Feuchtigkeitsgehalt der Proben wurde entsprechend dem ICC-Standard Nr.110/1 als Masseverlust nach dem Trocknen bei 130 °C bestimmt (ICC, 2001).

#### 4.3.2. Bestimmung des Mineralstoffgehalts

Die Bestimmung des Mineralstoffgehalts erfolgte nach dem ICC-Standard Nr. 104/1 durch Veraschen der Probe bei 900°C (ICC, 2001).

#### 4.3.3. Bestimmung des Stärkegehalts

Die Bestimmung des Stärkegehalts erfolgte nach dem abgewandelten polarimetrischen Ewers-Verfahren (EU-VO 228/67, 1967).

#### 4.3.4. Bestimmung des Rohproteingehaltes

Der Rohproteingehalt wurde gemäß ICC-Standard Nr. 105/2 nach dem Kjeldahl-Verfahren bestimmt (ICC, 2001).

#### 4.3.5. Bestimmung des Rohfettgehalts

Die Bestimmung des Rohfettgehalts erfolgte nach der Soxhlet-Verfahren durch kontinuierlichen Extraktion.

### 4.4. Rheologische Untersuchungen

#### 4.4.1. Farinograph

Mit dem Brabender-Farinograph werden im Labormaßstab aus Weizenmehl, Kichererbsenmehl und Wasser Teige hergestellt, die von gleicher Konsistenz sind, wie die Teige in der Praxis der Brotherstellung. Alle Mehle wurden nach der ICC-Methode Nr. 115/1 mit Hilfe des Farinographen der Firma Brabender Typ {Brabender, Mod. No. 8 101 06 (31,5 und 65 rpm)} zur Bestimmung der Wasseraufnahme und des Knetverhaltens der Teige untersucht. [111]. Zur Bestimmung der Wasseraufnahme und Kneteigenschaften eines Mehles werden 50 g in den Farinographen eingegeben und unter Zufuhr von Wasser geknetet. Auf den Zusatz von Ascorbinsäure wurde verzichtet, um die durch Zugabe der Kichererbsen (Vollkornmehl und Mehlfractionen) verursachten Veränderungen unbeeinflusst zu erfassen. Der Widerstand des sich bildenden Teiges gegenüber der mechanischen Beanspruchung wird in einem Farinogramm durch Drehmomentmessung über der Zeit erfasst.



Abb. 4.2: Brabender Farinograph

#### 4.4.2. Extensograph

Ein im Farinographen hergestellter Teig wird zunächst zu einer Teigkugel geformt und anschließend lang gewirkt und für eine Ruhezeit von 45, 90 und 135 Minuten in die Gärkammer des Extensographen eingebracht. Anschließend wird der Teig mit dem Dehnungshaken des Extensographen bis zum Zerreißen gedehnt. Die Dehnungsmessungen der Teige wurden mit dem Extensograph nach ICC Standardmethode Nr.114/1 durchgeführt [111].



Abb. 4.3: Brabender Extensograph

#### 4.4.3. Micro Visco-Amylo-Graph

Die Stärkeverkleisterung als eine unerlässliche Voraussetzung für den Backprozess wird in Brabender Micro Visco-Amylo-Graph nach ICC Standardmethode Nr.169 aufgezeichnet. Die Probe wird in einem rotierenden Messtopf aus rostfreiem Edelstahl mit Stiften kontrolliert aufgeheizt und wieder abgekühlt. Die integrierte, selbstoptimierende Temperaturregeleinheit ermöglicht in Verbindung mit der komfortablen Windows-Software die Programmierung und Speicherung beliebiger Temperaturprofile mit Heiz-/Kühlraten von 3 K/min. Ein in die Probe ragender Messfühler wird entsprechend der Viskosität der Probe im Messtopf ausgelenkt. Diese Auslenkung wird als Drehmoment gemessen.

Probegewicht	12 g
Wasser	92 ml
Drehzahl	115 [1/min]
Messbereich	250 [BE]
Start-Temperatur	30 [°C]
Max Temperatur	95 [°C]
End-Temperatur	30 [°C]
Heiz/Kühlrate	3 [°C/min]
Obere Haltezeit	15 [min]
End-Haltezeit	0 [min]



Abb. 4.4: Brabender Micro Visco-Amylo-Graph



#### 4.5. Fundamentale rheologische Untersuchungen

Für die rheologischen Untersuchungen (Strukturdetektion, Oszillationsmessungen und Kriechversuch) wurde das Laborgerät Hochleistungsreometer UDS 200 der Firma Paar Physica Messtechnik GmbH Stuttgart mit Peltier-Temperierung mit einem Platte-Platte-System (Meßsystem MP 31) verwendet. Eine hohe Messgenauigkeit wird durch Luftlagertechnik gewährleistet. Die Speicherung und Auswertung der gemessenen Daten erfolgt mittels der Software US 200. Mit Hilfe eines Temperierungssystems TEK180 wurde die untere Platte bei 25 °C temperiert.

Dazu sind Teige aus 100 g Mehl durch Zugabe von Leitungswasser mit Hilfe einer Handrührmaschine für 4 min (an einem Stativ befestigt und mit eingestellter Drehzahl) hergestellt worden. Die Teigprobe ca. 10 g, wurde zwischen den Platten 2 mm Spalt angepasst und die überflüssige Teigmenge mittels Pizzamesser entfernt. Um einen Feuchtigkeitsverlust und eine dadurch mögliche Austrocknung des Teigstückchens zu vermeiden, wurde der Rand der abgeschnittenen Probe mit Silikonöl eingestrichen. In Abb. 4.5 wird das Laborgerät UDS 200 gezeigt.



Abb. 4.5: Labormessgerät UDS 200

##### 4.5.1. Oszillationsmessungen

Die Kennwerte Speichermodul, Verlustmodul und Verlustfaktor wurden während der Messung registriert.

###### 4.5.1.1. Amplitudensweep

Bei der durchgeführten AS-Messung wurde bei einer konstanten Frequenz von 1 Hz, die Amplitude bzw. Deformation im Bereich von  $10^{-3} \leq \gamma \leq 1$  verändert. Diese Untersuchung gilt der Ermittlung der Amplitude, bei der alle Produkte noch eindeutig im linear viskoelastischen Bereich liegen. Zeit offen, 30 Messpunkte.

###### 4.5.1.2. Frequenzsweep

Hier wurde die Amplitude konstant bei  $\gamma = 10^{-3}$  gehalten. Dieser Wert ergibt sich aus den Messungen des Amplitudensweeps.

Die Frequenz durchlief zunehmend Werte von 0,1 Hz bis 100 Hz. Berechnungen wurden im Bereich von 0,1 - 10 Hz durchgeführt. Zeit offen, 30 Messpunkte.

#### 4.5.1.3. Temperatursweep

Bei konstanter Amplitude  $\gamma = 10^{-3}$ , sowie konstanter Frequenz 1 Hz wurde die Temperatur mit Heizraten von 1 K/min verändert. Die untersuchten Teige wurden bei Raumtemperatur vorbereitet.

Teig wird in den Spalt zwischen den Platten geführt und die Temperatur von 20 °C auf 90 °C erhöht. Durch den Temperaturversuch sollen die der Auswirkung des Backens auf strukturelle Veränderungen ermittelt und Backvorgänge simuliert werden.

#### 4.5.1.4. Timesweep

Bei einer konstanten Deformation von  $\gamma = 10^{-3}$  sowie konstanten Frequenz von  $f = 1$  Hz und bei einer Temperatur von  $T = 25$  °C wurde die Untersuchung für eine Zeitdauer 90 min durchgeführt.

Durch den Timesweep als typische Oszillationsmessung sollen die Teigentwicklung und die möglichen Wassertransportvorgänge in der Matrix beschrieben werden.

### 4.6. Kriechversuche

10 g Teig wurde in die Messgeometrie des Rheometers eingebracht. Der Messkörper (Platte MP 31) wird auf einen Spalt von 2 mm heruntergefahren. Der Teig erfährt nun für 60 s eine Belastung von 50 Pa.

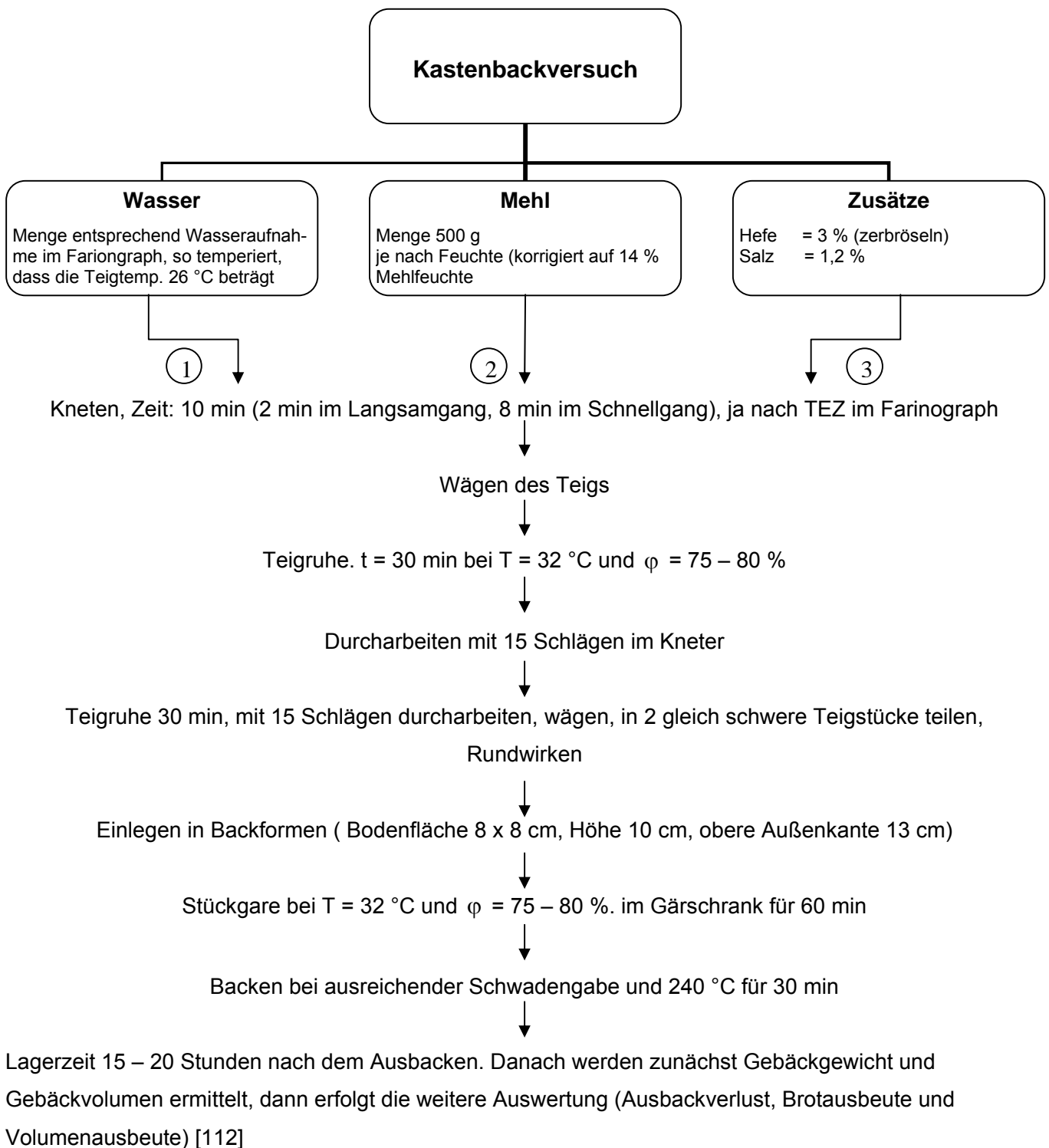
Die Entlastungsphase beträgt 180 s, so dass die Gesamtmessdauer von 240 s erreicht wird. Während des gesamten Messvorganges wird die Temperatur konstant auf 25 °C gehalten.

Abschnitt. Nr	Funktion	Typ der angewandten Belastung	Abschnittsdauer in s	Messpunkte
1	Belastung	$\tau = 50$ Pa konstant	60	30
2	Entlastung	$\tau = 0$ Pa	180	150

### 4.7. Backversuch

Da für die Durchführung eines RMT eine relativ aufwendige Geräteausstattung notwendig ist, wird in kleineren Mühlenbetrieben häufig Kasten Gebäck im Backversuch zur Beurteilung der Backeigenschaften der Mehle (WM sowie deren Mischungen mit KE) statt Rapid-Mix-Test (RMT) nach der Standardmethode ohne Zusatz von Chemikalien verwendet [112]. Es sind auch Backversuche durchgeführt worden, bei denen Anteile der KE-Fraktion zum WM (Type 405) zugemischt worden.

Dabei soll die Auswirkung der Partikulierung sowie der veränderten Qualität der KE-Fractionen auf die Teig- und Backeigenschaften des Handelsmehles untersucht werden.



#### 4.7.1. Bestimmung des Gebäckvolumens

Das Gebäckvolumen wurde ebenfalls am darauf folgenden Tag (nach 20 h) mit dem Volumenmessgerät nach Neumann/Dosse bestimmt [113].

#### 4.7.2. Bestimmung der Backeigenschaften

Nach einer Lagerzeit der Brote von 20 h wurden folgende sensorische Merkmale mit entsprechenden Merkmalausprägungen bewertet, siehe Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Sensorische Beurteilungskriterien des Gebäcks

Sensorische Merkmal	Merkmalausprägung
<b>Gebäckausbund</b>	gut, noch gut, befriedigend, mangelhaft
<b>Bräunung</b>	kräftig, zu kräftig, etwas kräftig, normal, noch normal, schwach, zu schwach , etwas schwach
<b>Krustenrösche</b>	normal, noch normal, hart, zu hart, weich, zu weich, hartsplittrig, weichsplittrig
<b>Porengleichmäßigkeit</b>	gleichmäßig, ziemlich gleichmäßig, ungleichmäßig, Hohlräume
<b>Krumenelastizität</b>	normal, noch normal, geschwächt, ziemlich geschwächt, ungenügend
<b>Geschmack und Geruch</b>	einwandfrei, beeinträchtigt, fremde Geschmack oder Geruch

#### 4.8. Statistische Auswertung / Reproduzierbarkeit

Die statistische Auswertung hatte das Ziel, die Zuverlässigkeit und Signifikanz der gewonnenen Ergebnisse zu prüfen und sie als eine relevante Basis für Schlussfolgerung zu bestätigen.

Die Messungen wurden generell als Doppelbestimmung durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse zu sichern. Die Durchführung der statistische Analyse erfolgte mit Hilfe der Statistik-Software SAS (Statistical Analysis System version. 9.1). Zur Überprüfung der Signifikanz des Unterschiedes von Mittelwertsdifferenzen zwischen den Vergleichsproben sowie des Einflussparameters wurde der F-Tests herangezogen, um zu prüfen, ob zwischen den Vergleichsproben irgendein Unterschied signifikant ausfallen würde. War dies der Fall, kam in der sogenannte „Tukey-Test“ bei  $\alpha = 0,05$  zum Einsatz. Für die durchgeführten Versuche wurde ein Vertrauensbereich von 95 % standardmäßig festgelegt, woraus ein Signifikanzniveau ( $p$ )  $p < 0,05$  resultiert und die Aussage mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $< 5 \%$  erfolgt.

Bei einem Signifikanzniveau von  $p < 0,01$  wird das Ergebnis als hochsignifikant bezeichnet, die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt noch höchstens 1 % und es wird als signifikant bezeichnet, wenn das Signifikanzniveau  $p < 0,05$  beträgt, Irrtumswahrscheinlichkeit also kleiner 5 % ist. Je kleiner der vorgegebene Signifikanzwert ist, desto weniger Mittelwertunterschiede werden ausgewiesen [114].

## 5. Inhaltsstoffe und Korngrößenverteilung der Ingredienzien

### 5.1. Mehlinhaltsstoffe

Die funktionellen Eigenschaften der Inhaltsstoffe der Versuchsmehle, insbesondere die Hauptkomponenten Stärke und Proteine, bewirken eine spezifische Backfähigkeit. In Tab. 5.1 sind die Inhaltsstoffe der verwendeten Mehle als Eigenanalyse zusammengestellt.

Tab. 5.1: Inhaltsstoffzusammensetzung des WM- und KE-Mehls sowie KE-Fraktionen F1, F2 und F3

Probe	WM	KE	F1	F2	F3
Feuchtigkeitsgehalt %	12,5	9,5	9,6	9,6	9,8
Mineralstoffgehalt %	0,48	2,8	2,2	2,5	2,7
Stärkegehalt %	63,5	51,2	49,7	47,9	44,3
Proteingehalt % (N * 5.7)	11,9	25,5	24,6	24,9	23,4
Fettgehalt %	1,8	5,0	4,95	4,97	4,72

### 5.2. Zerkleinerung / Laserpartikelanalytik

Teige als Zwischenprodukt der Backwarenherstellung werden nach dem Mahlen des jeweiligen Getreiderohstoffes nach Wasserzugabe und mechanischer Agitation hergestellt. Der Zerkleinerungsgrad des Getreides kann durch eine Sieb- bzw. Laserpartikelanalyse ermittelt werden und ist gleichzeitig ein Indikator für den mechanischen Aufschluss des Rohstoffes sowie seine Backeigenschaften.

Vor der Kichererbsenvermahlung wurden diese auf 12 % Feuchtigkeit benetzt, um über einen optimalen Feuchtgehalt eine gute Abtrennung der Schalen vom Mehlkörper zu sichern und um feinere Mehlpartikel zu erhalten. Nach Zugabe des Wassers verbessern sich die Brucheigenschaften und Sprödhverhalten. Das Wasser wird von der Schalenschicht aufgenommen und führt zu einer Lockerung der Stärke-Proteinmatrix (Mehlkörperstruktur). Die Zerkleinerung der Kichererbsen in einer Hammermühle führt zu einer nahezu vollständigen Auflösung der Kornzellstruktur in freiliegende Stärkekörner und freiliegende Proteinteilchen. Es ist davon auszugehen, dass sich die inhaltliche Zusammensetzung der Mehle durch die Zerkleinerung nicht ändert. Infolge der unterschiedlichen Zerkleinerungsverfahren des Ausgangsmehles (WM- und KE-Mehl) werden bei der Partikelgrößenbestimmung unterschiedliche Fraktionen bzw. Masseanteile am Beispiel der Einzelhäufigkeit  $q$  bestimmt.

Die Kichererbsen wurden mit der Hammermühle anhand von Vorversuchen zerkleinert und das KE-Gesamtmehl durch Sieben u. a. fraktioniert. Kriterien der Fraktionierung sind:

F1:  $\leq 160 \mu\text{m}$ ;

F2:  $160 \leq F2 \leq 400 \mu\text{m}$ ;

F3:  $400 \leq F3 \leq 1200 \mu\text{m}$

### 5.2.1. Einzelhäufigkeitsverteilung

In Abb. 5.1 ist die Einzelhäufigkeitsverteilung der verwendeten Mehle nach LPA-Messung dargestellt.

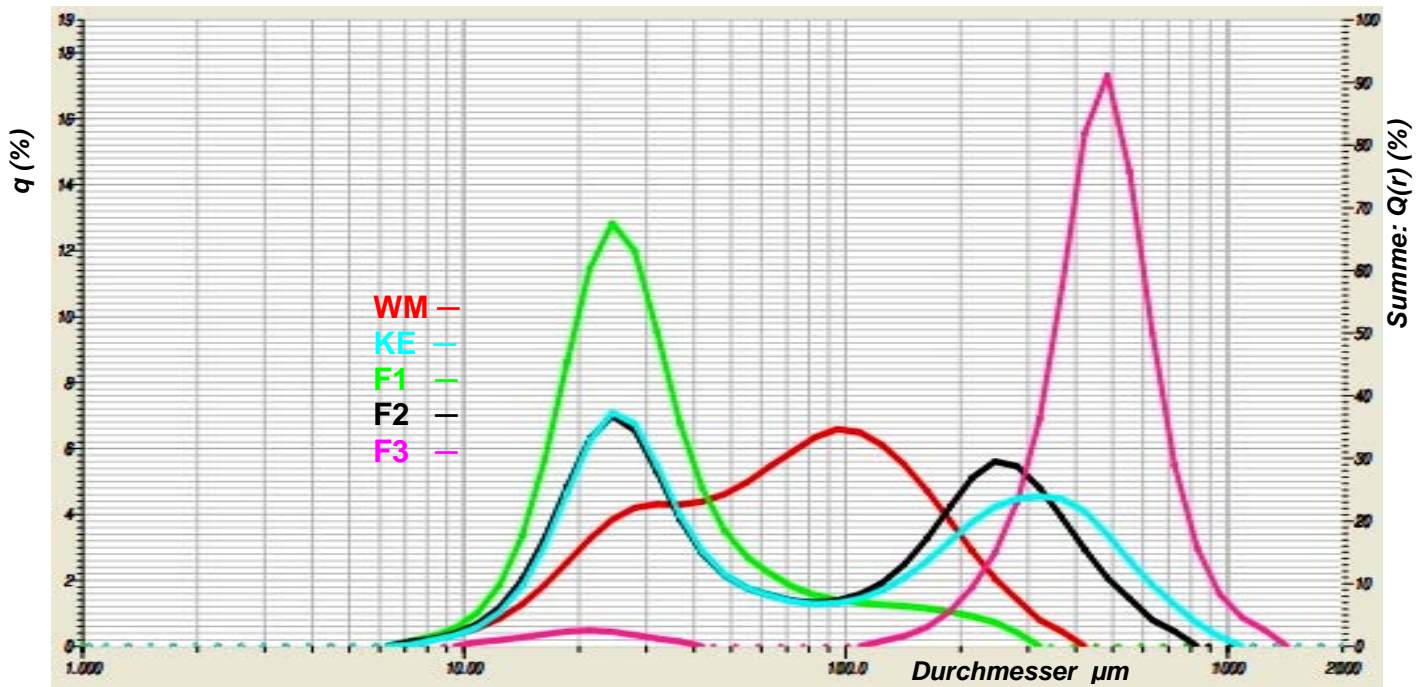


Abb. 5.1: Einzelhäufigkeitsverteilung der Mehle

In Abb. 5.1 ist erkennbar, dass die Verteilungsfunktionen des KE-Mehls sowie die Fraktion F2 eine Bimodaleverteilung aufweisen, die für ein mit Hammermühle ermahlenes Mehl typisch ist. Das Weizenmehl sowie die vorselektierten KE-Fraktionen F1 und F3 weisen eine andgedeutete Binomialverteilung auf. Eine differenzierte Beschreibung der Versuchsdaten ist in Tab. 5.2. zur Kornbandcharakterisierung enthalten.

Tab. 5.2: Ergebnisse der Laserpartikelanalytik

Mehl	$d_{10}$	$d_{50}$	$d_{90}$	$s$	arithmetischer Durchschnittswert	geometrischer Mittelwert	spez. Oberfläche
	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\text{cm}^2/\text{cm}^3$
<b>WM</b>	22	72	183	68	90	67	1250
<b>KE</b>	19	71	453	191	174	85	1357
<b>F1</b>	16	28	84	43	42	32	2257
<b>F2</b>	19	69	364	151	147	78	1407
<b>F3</b>	265	461	702	190	474	417	229

Ein direkter Vergleich des WM- mit dem KE-Mehl weist erhebliche Unterschiede am Beispiel des  $d_{90}$ -Wertes auf. Die F1-Fraktion ist am Beispiel des  $d_{50}$ - und  $d_{90}$ -Wertes geringer partikuliert als das zugekaufte Weizenmehl. Eine Singularität liegt bei allen Partikelkennwerten der Fraktion F3 vor. Anhand der Laserpartikelanalytik ist die KE-Fraktion F2 als dem Weizenmehl am ähnlichsten einzuschätzen.

In Abb. 5.2 ist ein Vergleich der spezifischen Oberfläche (rechte Achse) und des Medianwertes (linke Achse) durchgeführt.

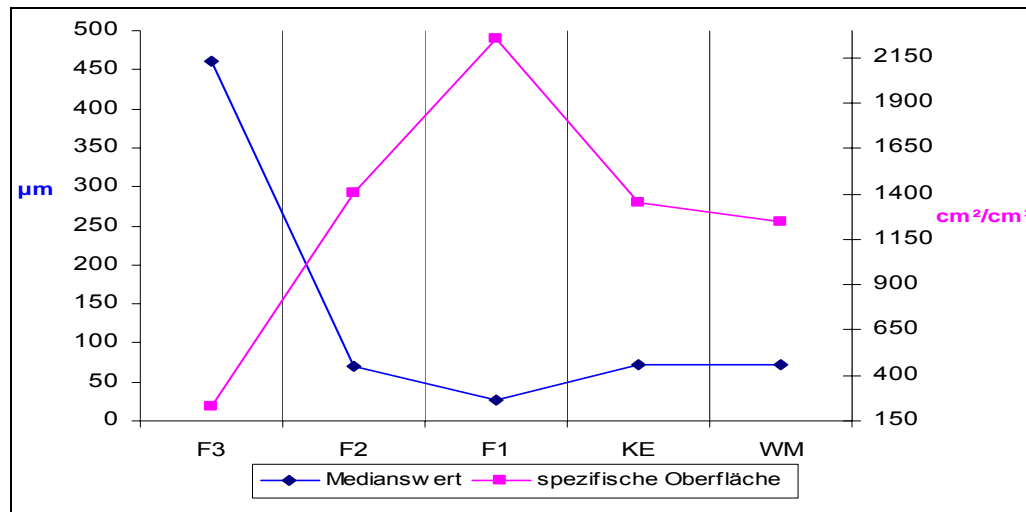


Abb. 5.1: spezifische Oberfläche und mittlere Teilchengröße der Mehle

Beide Einflussgrößen korrelieren physikalisch korrekt indirekt miteinander. Als Singularität sind die Fraktionen F1 und F3 erkennbar. Am Beispiel der aufgeführten Kennwerte KE und F2 bestehen erneut die Übereinstimmung die bereits genannte Binomidalverteilung (sowie ein verschobenener Flankenansatz bei WM und F1, siehe Abb. 5.1).

### 5.2.2. Summenhäufigkeitsverteilung

In Abb. 5.3 ist die Summenhäufigkeitsverteilung der Mehle bzw. KE-Fractionen dargestellt.

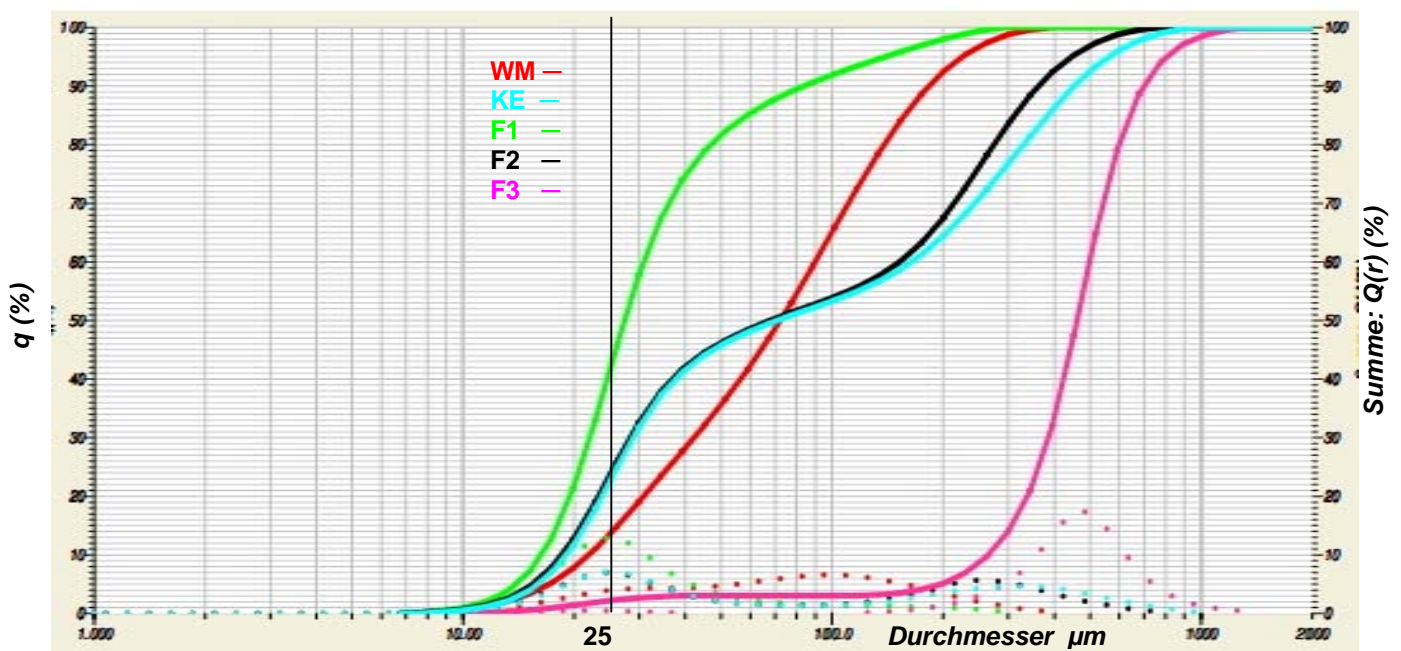


Abb. 5.3: Summenverteilung der Mehle

Aus der Abb. 5.3 ist zu entnehmen, dass die eingesetzten Mehle ein heterogenes Partikelverhalten aufweisen. Das WM-Mehl weist ein vergleichsweise homogenes Kornband auf. Ähnliche Verläufe der Summenhäufigkeitskurve mit minimaler und maximaler Partikulierung liegen für F1 und F3 vor. Für die Mehle aus KE und F2 wird ein angedeuteter Kornsprung im Messband nachgewiesen.

Ob die vorliegenden inhomogenen Partikelspektren Einfluss auf die Kompatibilität der Strukturausbildung besitzen, wird später durch rheologische Messungen nachgewiesen.

### **5.3. Kapitelzusammenfassung**

Eine Inhaltsstoffanalyse der in den Versuchen eingesetzten Mehlkomponenten erfolgt und bestätigt die unterschiedliche Zusammensetzung von WM- und KE-Mehl.

Die Partikelgrößenbestimmung am Beispiel von Einzel- und Summenhäufigkeit wird mit Hilfe von Laserpartikelmessungen durchgeführt. Eine weitere Differenzierung des KE-Mehls in die Unterfraktionen F1, F2 und F3 wird durchgeführt. Die Kichererbsenkennwerte liegen mit Ausnahme der Fraktion F3 in einer Größenordnung. Als Zerkleinerungsmaschine wurde für Kichererbsen die Hammermühle eingesetzt. Erstmals entsteht hier neben den unterschiedlichen Proteinspektren zwischen Weizen- und Kichererbsen der Verdacht, dass das Partikelspektrum einen Einfluss auf das viskoelastische Verhalten der Teige ausüben kann.

Erhebliche Unterschiede im Mahlgut der Gesamtfractionen von Weizenmehl und Kichererbsenmehl werden am Beispiel der  $d_{50}$  und  $d_{90}$ -Daten (hier größte Unterschiede) nachgewiesen. Binomialverteilungen liegen ausgeprägt für die Mahlprodukte F2 und KE vor (Kornsprung).



## 6. Teigphysikalische Untersuchungen

Nachstehend werden die Versuchsergebnisse der konventionellen teigphysikalischen Untersuchungen am Beispiel der Farinograph-, Extensograph- und Micro Visco-Amylo-Graph-Messungen dargestellt.

### 6.1. Farinograph Untersuchungen

Die Teigeigenschaften sind ein Kriterium für die Qualität eines Mehles. Die Zugabe einer Komponente mit unterschiedlicher Mehlpartikelgröße beeinflusst nicht nur die Mehlsstruktur, sondern auch die funktionellen Eigenschaften der Mischmehle.

#### 6.1.1. Weizenmehlteig (Gesamtfraktion)

In Abb.6.1 sind exemplarisch für das eingesetzte WM-Mehl Farinogrammverläufe dargestellt.

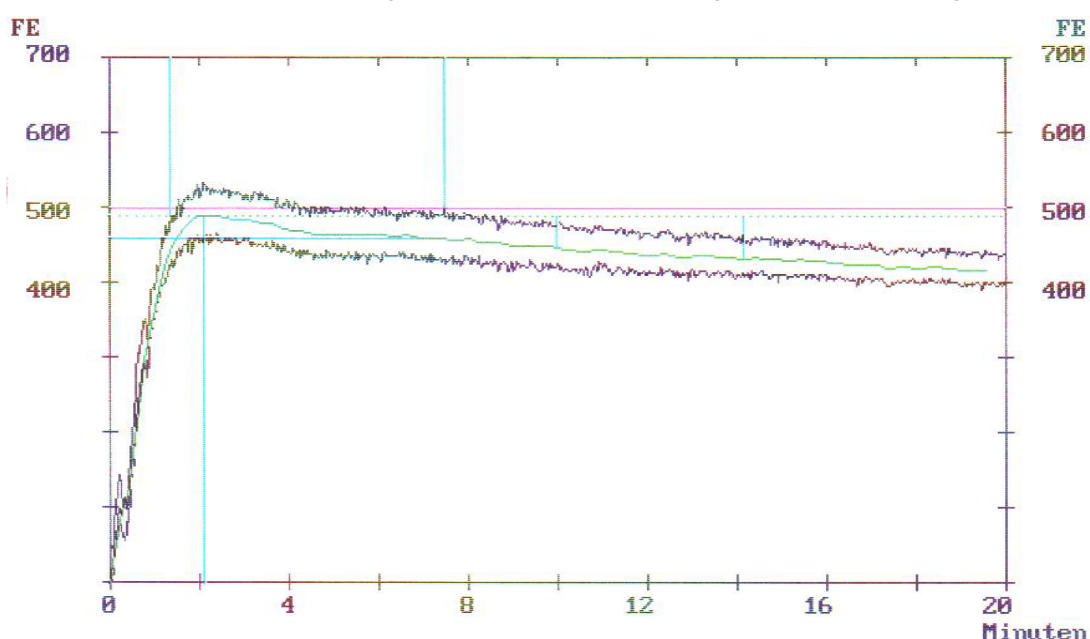


Abb.6.1: Farinogramme des Weizenteigs

Das Mehl aus Weizen hat nach der ICC-Methode 58,8 % Wasser aufgenommen und besitzt eine Teigentwicklungszeit von 2,1 min, eine Stabilität von 6,1 min und Erweichung von 44 FE. Ein leichter Abfall der Teigkonsistenz mit 491 FE wurde beim Weizenteig registriert. Die Versuchdaten sind in Tab. 6.1 aus einer Doppelbestimmung erhalten.

Tab.6.1: Farinogrammdaten des Weizenteigs

Probe	Mehlfeuchte %	TK FE	WA %	TEZ min	TST min	TER FE
<b>WM</b>	<b>13,7</b>	<b>491</b>	<b>58,8</b>	<b>2,1</b>	<b>6,1</b>	<b>44</b>

#### 6.1.2. Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktionen)

In Abb.6.2 sind exemplarisch für das KE-Mehl Farinogrammverläufe dargestellt.

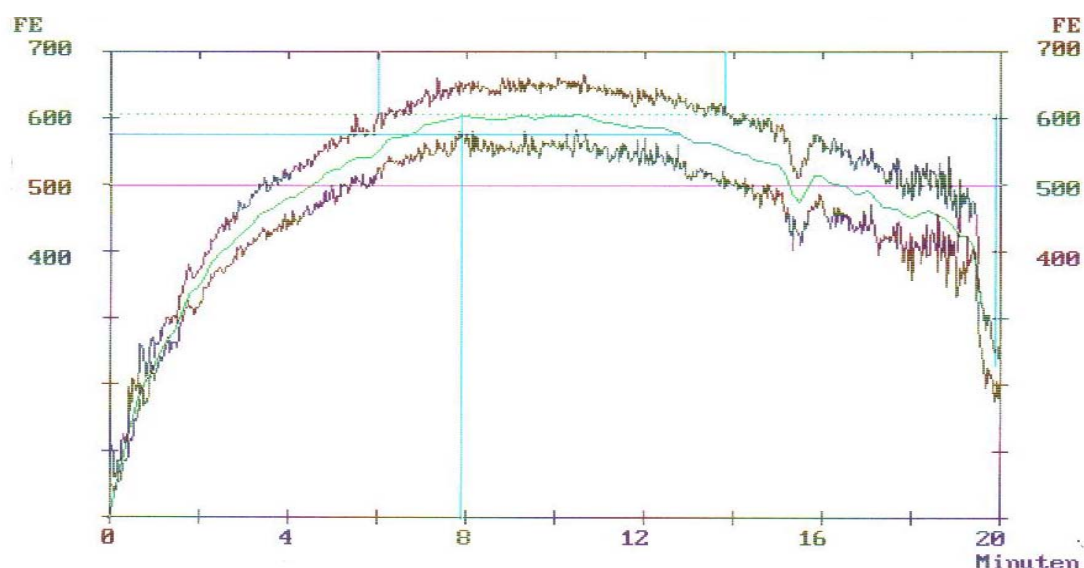


Abb.6.2: Farinogramme des Kichererbsenteigs

Anders verhält sich der Kichererbsenteig im Farinogrammkurvenverlauf (siehe Abb.6.2) im Vergleich mit Weizenteig. So beträgt die Wasseraufnahme 63,5 %. Die Teigentwicklungszeit liegt bei 7,9 min und die Erweichung liegt nur bei 2 FE, während die Teigstabilität eines Werts von 7,8 min aufweist. Die Teigkonsistenz liegt oberhalb der Linie 500 FE und weist einen Wert von 608 FE auf.

Tab.6.2: Farinogrammdaten des Kichererbsenteigs

Probe	Mehlfeuchte %	TK FE	WA %	TEZ min	TST min	TER FE
<b>KE</b>	<b>9,1</b>	<b>608</b>	<b>63,2</b>	<b>7,9</b>	<b>7,8</b>	<b>2</b>

Die Abb. 6.1 und Abb. 6.2 weisen die mittels Farinographmessung erfassten Unterschiede des Knetverhaltens von Modellteigen aus WM-Mehl und KE-Mehl im direkten Vergleich auf. Die rheologischen Untersuchungen geben erste Hinweise darauf, dass die mit KE-Mehl erstellten Modellteige einen geringeren TER bei einer deutlich erhöhten TEZ sowie der TK im Vergleich zu WM-Mehlteigen aufweisen und damit keine identischen rheologischen Eigenschaften besitzen, da beim KE-Mehl kaum der Aufbau des Klebnetzes möglich ist.

### 6.1.3. Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl)

Beth und Shehata et. Al. (1970) [115] berichteten, dass der gebildete Teig einer Kombinationen zwischen dem WM-Mehl und dem Kichererbsenanteil von 5, 10, 15 und 20 % keine deutlichen Auswirkung auf die physikalischen Eigenschaften sowohl im Farinograph als auch im Extensograph aufzeigten. Andere Forscher berichteten, dass sich mit Erhöhung der Legminosenteile die WA verringert [116]. Diese Ergebnisse korrelieren nicht mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit. Die Zugabe von Kichererbsenmehl zum WM-Mehl in den Mischungen weist einen erheblichen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften des Teiges nach. Die Ergänzung des WM-Mehls mit KE-Mehl besitzt eine

nachteilige Wirkung auf die materialwissenschaftlichen Eigenschaften des Teigs im Vergleich mit Weizenteig. Aus nutritiver Sicht ist die Verwendung von Kichererbsen sinnvoll, wenn die sich nachteilig ausbildenden Teigeigenschaften durch Grenzwerte in den Mehlmischungen negiert werden können. Die Änderungen der Teigeigenschaften können auf die Reduzierung und die Schwächung der Glutenbildung zurückgeführt werden. Die Veränderung im Wasserinteraktionsverhalten von zwei Proteintypen (Weizen und Kichererbsen) kann ein weiterer Grund für die Unterschiede in Teigeigenschaften sein [117, 118]. Auch eine mechanische Schädigung der proteindeterminierten Strukturen durch Schereffekte ist denkbar [100]. Die Ergebnisse der Knetversuche der Mehlmischungen werden in der Abb. 6.3 dargestellt.

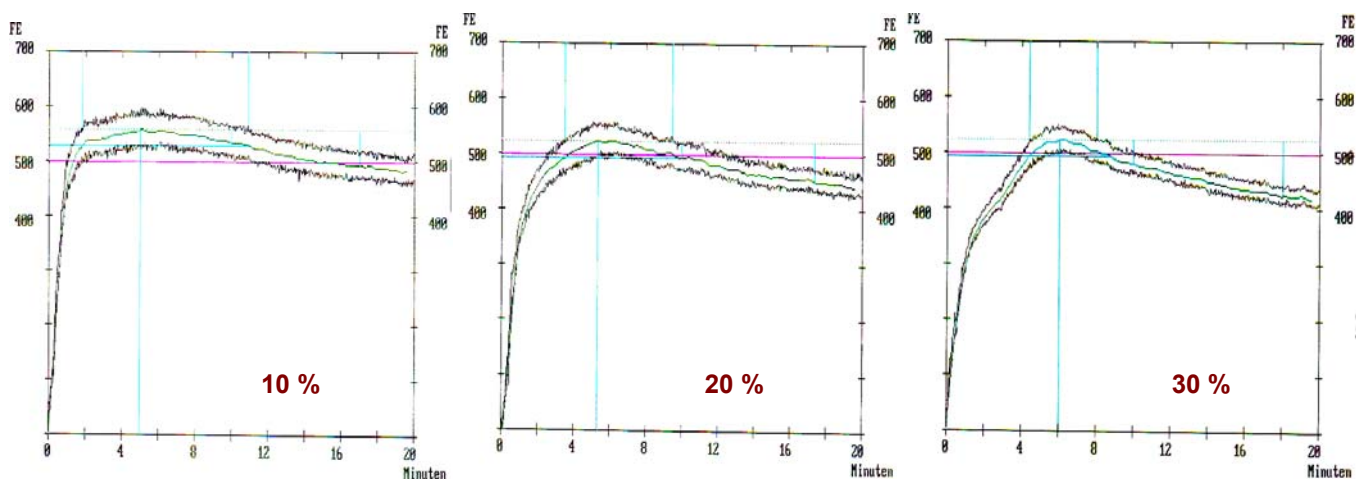


Abb.6.3: Farinogramme der Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl)

In der Tab. 6.3 sind die Kennwerte der Mehlmischungen im Vergleich zum WM- und KE-Teig dargestellt.

Tab.6.3: Farinogrammdaten der Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl)

Probe	Mehlfeuchte %	TK FE	WA %	TEZ min	TST min	TER FE
<b>WM</b>	<b>13,7</b>	<b>491</b>	<b>58,8</b>	<b>2,1</b>	<b>6,1</b>	<b>44</b>
<b>KE 10 %</b>	<b>12,6</b>	<b>559</b>	<b>59,9</b>	<b>5,0</b>	<b>9,1</b>	<b>24</b>
<b>KE 20 %</b>	<b>12,6</b>	<b>530</b>	<b>61,0</b>	<b>5,3</b>	<b>6,0</b>	<b>30</b>
<b>KE 30 %</b>	<b>12,5</b>	<b>528</b>	<b>62,5</b>	<b>6,0</b>	<b>3,6</b>	<b>42</b>
<b>KE</b>	<b>9,1</b>	<b>608</b>	<b>63,2</b>	<b>7,9</b>	<b>7,8</b>	<b>2</b>

Aus der Tab. 6.3 nach Abb. 6.3 ist zu erkennen, dass sich mit dem zunehmenden KE-Anteil in den Mischungen die Wasseraufnahmekapazität deutlich erhöht, was auf eine Erhöhung des Protein- und Pentosangehalts, insbesondere Ribose und Desoxyribose (Nicht-Stärke Polysaccharide) sowie die Verringerung des Anteils an unlöslichen Proteinfractionen durch den KE-Mehlanteil zurückzuführen ist [11, 117, 119, 120, 121, 122]. Darüber hinaus spielen die Pentosane ebenfalls eine bedeutende Rolle für die Wasseraufnahme. Pentosane können etwa das 10-fache ihres Gewichts an Wasser binden. Im WM-Mehl binden sie ca. 20 % vom Schüttwasser. Von der Stärke werden je nach Beschädigungsgrad etwa 47 % des

Schüttwassers aufgenommen, während Proteine ca. 45 % binden [123]. Die Erhöhung der WA mit zunehmendem KE-Anteil in den Mischungen könnte auch durch die größere Anzahl der Hydroxylgruppen begründet werden [124]. Die vorliegenden Messbänder der Mehlmischungen liegen im Vergleich zum WM-Mehl oberhalb der Linie 500 FE (höhere TK). Die erhöhte TEZ auf 6 min bei der Mischung 30 % KE, sowie die Verringerung der TST auf 3,6 min weisen eine Schwächung der Glutennetzwerkskonfiguration während des Knetens nach. Dies ist auf eine deutliche Inkompatibilität des Kichererbsenproteinspektrums mit Kleberprotein des WM-Mehls zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, dass durch eine zunehmende Beimischung von Kichererbsen die energetischen Anforderungen für eine optimale Entwicklung der Teigkonsistenz erhöht werden, was auf den gesteigerten mechanischen Agitationsbedarf der nicht Gluten-Proteine im Teigsystem durch den KE-Anteil bedingt ist. Diese Aussage steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Untersuchungen von Abdel-Kader (2000) [125], der berichtet, dass sich die TEZ mit zunehmendem Bohnenanteil von 5, 10, 15 und 20 % in den Mischungen mit WM-Mehl deutlich erhöht. Wie zu erwarten, verschlechtert sich die TST mit der Erhöhung des Kichererbsenanteils in den Mischungen, da die TST eines Mehls in erster Linie von den Gluteneigenschaften bzw. den Proteineigenschaften abhängig ist. Sie wird wesentlich durch Wasseraufnahmefähigkeit, Schaumbildung, Emulgierfähigkeit und die Emulsionsstabilität des vorhandenen Proteinanteils in den Mehlmischungen beeinflusst. Trotz höheren Gluteningehalts des KE-Mehls von ca. 18,1 % weist die Mischung eine Schwächung des Glutennetzwerks auf. Dies bestätigt Angaben aus der Literatur. Beide Proteinfractionen (Gliadine und Glutenine) müssen zur optimalen Glutennetzentwicklung in einem bestimmten Verhältnis vorliegen.

#### 6.1.4. Kichererbsenfraktion F1 ( $\leq 160 \mu\text{m}$ )

Nachfolgend soll der Einfluss der Partikulierung auf die Netzwerkausbildung untersucht werden.

In der Abb. 6.4 ist die Farinographmessung der Mehlmischungen aus KE-Fraktion F1 und WM-Mehl in drei Mischverhältnissen dargestellt.

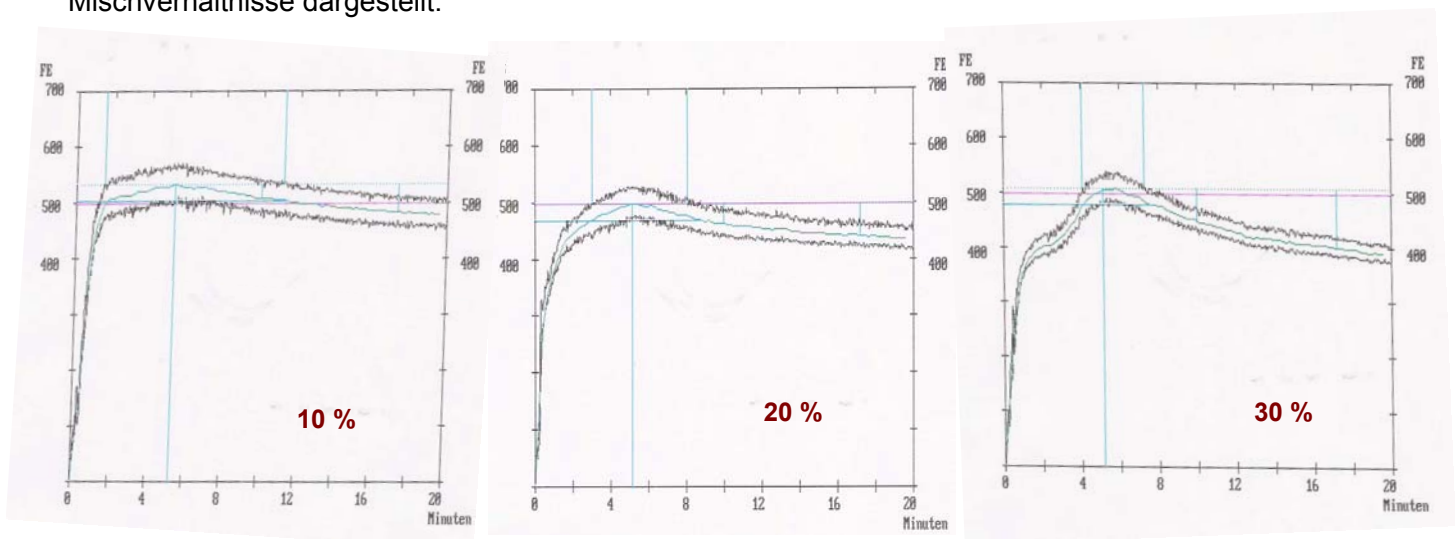


Abb. 6.4: Farinogramme der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F1)

Die Ergebnisse der farinographischen Untersuchungen der Fraktionsmischungen in Tab. 6.4 zeigen mit der Erhöhung der Fraktion F1 in den Mischungen einen geringfügigen Anstieg der WA bei der Teigbereitung. Bei einem Mischverhältnis von 30 % F1 besteht mit 61,7 % eine um 2,9 % höhere WA als beim WM-Mehl.

Tab. 6.4: Farinogrammdaten der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F1)

Probe	Mehlfeuchte %	TK FE	WA %	TEZ min	TST min	TER FE
<b>WM</b>	<b>13,7</b>	<b>491</b>	<b>58,8</b>	<b>2,1</b>	<b>6,1</b>	<b>44</b>
<b>10 % F1</b>	<b>12,5</b>	<b>530</b>	<b>59,7</b>	<b>5,3</b>	<b>9,7</b>	<b>25</b>
<b>20 % F1</b>	<b>11,8</b>	<b>512</b>	<b>61,5</b>	<b>5,2</b>	<b>5,1</b>	<b>37</b>
<b>30 % F1</b>	<b>11,4</b>	<b>509</b>	<b>61,7</b>	<b>5,2</b>	<b>3,2</b>	<b>59</b>
<b>KE</b>	<b>9,1</b>	<b>608</b>	<b>63,2</b>	<b>7,9</b>	<b>7,8</b>	<b>2</b>

Aus den Farinogrammen (Abb. 6.4) ist auch eine Erhöhung der TST von 6,1 min beim WM-Mehl auf 9,7 min, bei der Mischung mit 10 % F1 zu erkennen, die erneut mit steigenden Fraktionsanteilen in den Mischungen (20 % und 30 %) abnimmt. Dieses Verhalten weist auf eine Verschlechterung der Glutennetzwerksausbildung durch die Zumischungen von KE-Fractionen hin. Die TEZ und die TER änderten sich wesentlich und charakterisieren ebenfalls schwache Gluteneigenschaften. Hieraus lässt sich auch ableiten, dass der WM-Teig bei den Zumischungen mit der KE-Fraktion in seinen Struktureigenschaften negativ beeinflusst worden ist.

#### 6.1.5. Kichererbsenfraktion F2 ( $160 \mu\text{m} \leq F2 \leq 400 \mu\text{m}$ )

In der Abb. 6.5 ist die Farinographmessung der Mehlmischungen aus KE-Fraktion F2 und WM-Mehl in drei Mischverhältnissen als Doppelversuch dargestellt.

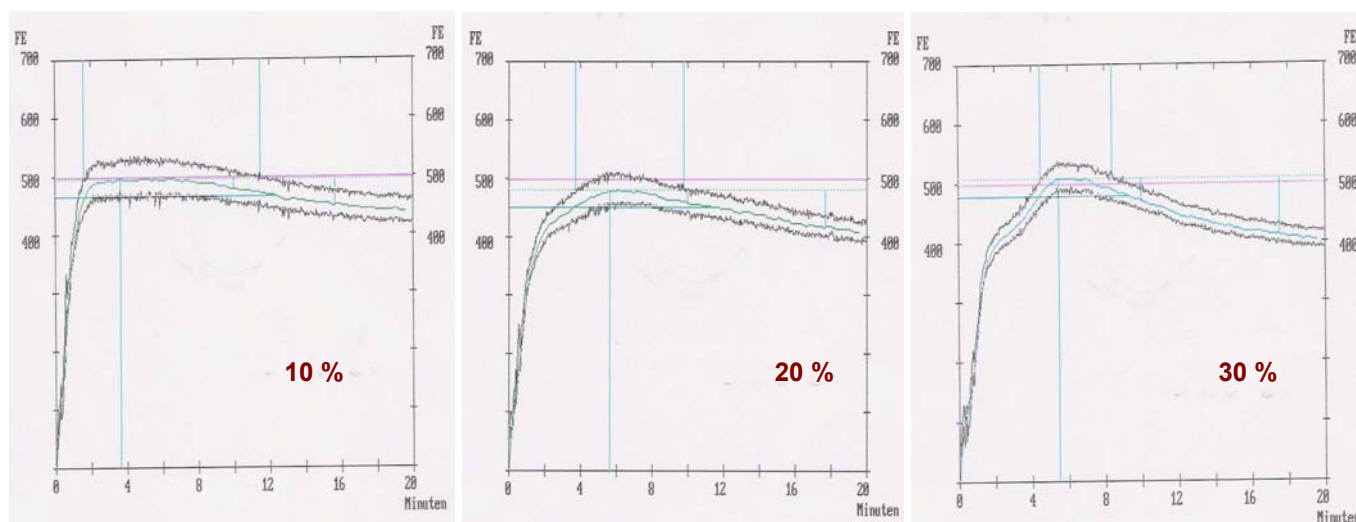


Abb. 6.5: Farinogramme der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F2)

In der Tab. 6.5 sind die Messdaten der Knetversuche von Fraktionsmischungen F2 im Vergleich zum WM- und KE-Teig aufgelistet worden.

Tab.6.5: Farinogrammdaten der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F2)

Probe	Mehlfeuchte %	TK FE	WA %	TEZ min	TST min	TER FE
<b>WM</b>	<b>13,7</b>	<b>491</b>	<b>58,8</b>	<b>2,1</b>	<b>6,1</b>	<b>44</b>
<b>10 % F2</b>	<b>12,4</b>	<b>510</b>	<b>61,9</b>	<b>3,7</b>	<b>9,9</b>	<b>17</b>
<b>20 % F2</b>	<b>11,5</b>	<b>492</b>	<b>62,5</b>	<b>5,5</b>	<b>6,1</b>	<b>23</b>
<b>30 % F2</b>	<b>11,3</b>	<b>485</b>	<b>64,3</b>	<b>5,7</b>	<b>3,9</b>	<b>38</b>
<b>KE</b>	<b>9,1</b>	<b>608</b>	<b>63,2</b>	<b>7,9</b>	<b>7,8</b>	<b>2</b>

Bei einem Zusatz der mittleren Fraktion F2 verschlechterten sich die Teigigenschaften des WM-Mehls am geringsten. Die TEZ und die TST haben zugenommen. Eine deutliche Zunahme der WA um 5,5 % wurde bei der Mischung 30 % festgestellt. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass die Fraktion F2 aus rheologischer Sicht als dem Weizen am Ähnlichsten einzuschätzen ist.

#### 6.1.6. Kichererbsenfraktion F3 ( $\geq 400 \mu\text{m}$ )

Es wurden weitere Farinogramme aufgenommen, bei denen die grobe KE-Fraktion F3 zu einem (WM-Mehl Type 405) anteilig beigemischt worden sind.

Zum WM-Mehl wurden Anteile von 10 %, 20 % und 30 % beigemischt. Damit kann ermittelt werden, in wieweit sich die veränderten Partikelgrößen des KE-Mehls auf die teigphysikalischen Eigenschaften des WM-Mehls auswirken. In der Abb. 6.6 sind die aufgezeichneten Knetkurven der Fraktionsmischungsmehle F3 im Farinographen dargestellt.

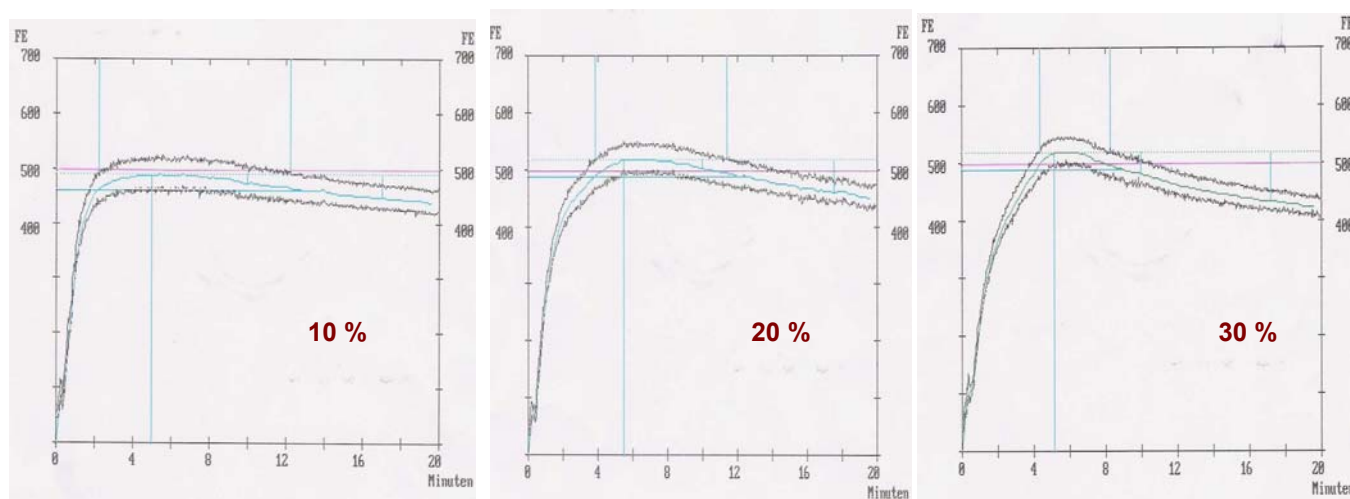


Abb.6.6: Farinogramme der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F3)

In der Tab. 6.6 sind die Messdaten der Knetversuche von Fraktionsmischungen F3 im Vergleich zum WM- und KE-Teig erfasst worden.



Tab. 6.6: Farinogrammdaten der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F3)

Probe	Mehlfeuchte %	TK FE	WA %	TEZ min	TST min	TER FE
<b>WM</b>	<b>13,7</b>	<b>491</b>	<b>58,8</b>	<b>2,1</b>	<b>6,1</b>	<b>44</b>
<b>10 % F3</b>	<b>12,5</b>	<b>490</b>	<b>63,8</b>	<b>4,9</b>	<b>10</b>	<b>16</b>
<b>20 % F3</b>	<b>11,4</b>	<b>517</b>	<b>65,6</b>	<b>5,4</b>	<b>7,7</b>	<b>15</b>
<b>30 % F3</b>	<b>11,3</b>	<b>528</b>	<b>66,5</b>	<b>5,2</b>	<b>4,1</b>	<b>38</b>
<b>KE</b>	<b>9,1</b>	<b>608</b>	<b>63,2</b>	<b>7,9</b>	<b>7,8</b>	<b>2</b>

Die beigemischte Fraktionsmenge bewirkte keine Abnahme, sondern eine stetige Steigerung der WA. Beim Mischverhältnisse von 30 % F3 mit 66,5 % zeigt sich eine um 7,7 % höhere WA als beim WM-Mehl. Die steigende WA deutet auf höhere Teigausbeuten der Fraktionsmischungen hin, was auf eine Erhöhung der Proteinmenge in den Mischungen zurückzuführen ist.

Dagegen ist die Erhöhung der TEZ und der TER festgestellt worden. Diese waren schon beim Zusatz des KE-Mehl (Gesamtfraktionen) zu erkennen. Das ist auf die Dominanz des verwendeten WM-Mehls zurückzuführen. Die WA der Mehle ist ein wichtiges Qualitäts- und Rentabilitätsmerkmal. Eine stärkere Wasserbindung begünstigt daher Brotfrischhaltung und ist allerdings nur dann positiv zu werten, wenn sie mit einer mittleren bis höheren Proteinqualität und -menge kombiniert ist.

## 6.2. Extensograph Untersuchungen

Die Dehnungseigenschaften von Teigen aus WM-Mehl und deren Mehlmischungen mit KE-Mehl wurden mittels Brabender-Extensogramm-Untersuchungen ermittelt. Während diese Untersuchungsmethode bei allen Mischungen mit KE-Mehl und deren Fraktionen anwendbar war, musste die Versuchsdurchführung bei einem KE-Mehl erfolglos abgebrochen werden, da kein homogen ausgebildetes Netzwerk vorlag. Reines KE-Mehl bildeten beim Kneten im Extensographen inhomogenes, bockiges Material. Durch den höheren Gluteningehalt allein kann kein Glutennetzwerk ausgebildet werden.

Die Teigeigenschaften ließen eine Erfassung von Belastungs- und Dehnungskurven im Extensographen nicht zu. Als Messergebnis wurden die Extensogramme nach 45, 90 und 145 min Ruhezeit ausgewertet.

### 6.2.1. Weizenmehlteig (Gesamtfraktion)

Dieser Teigtest zeigt die Dehnfähigkeit und den Dehnwiderstand eines Teigstranges an. Die Dehnbarkeit eines Mehles ist von Gluteneigenschaften des hergestellten Teigs abhängig.

Für Backzwecke wird meist eine hohe Dehnbarkeit der Teige gewünscht. Die folgende Abb. 6.7 zeigt die an WM-Mehl der Type 405 im Brabender-Extensographen nach 45, 90 und 135 min Teigruhezeit ermittelten Untersuchungsergebnisse.

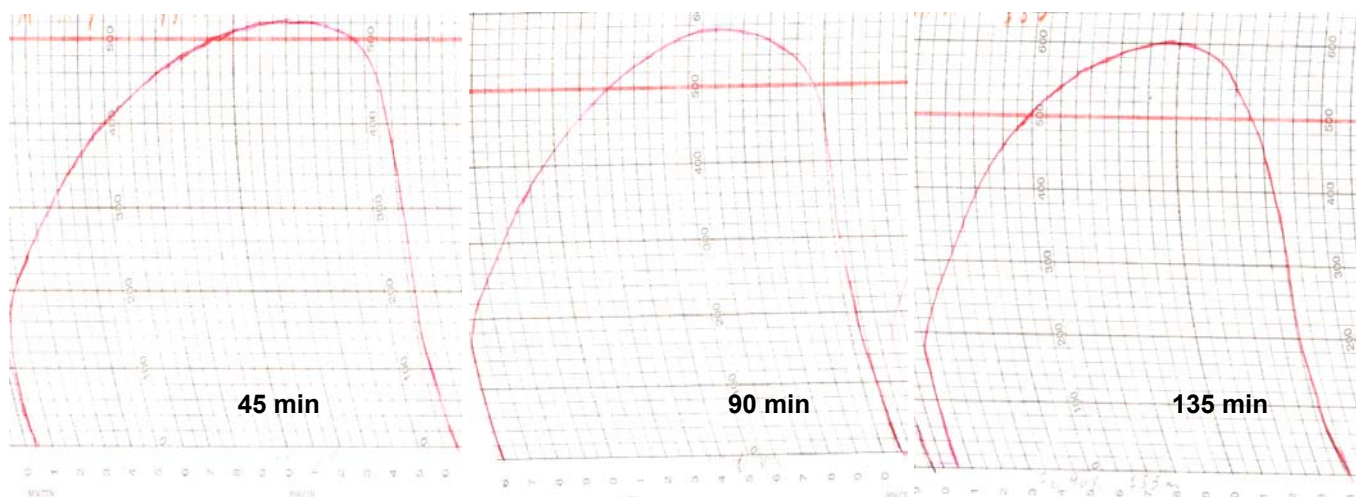


Abb.6.7: Beispielhafter Vergleich zwischen Extensogrammen des WM-Teigs nach 45, 90 und 135 min

In der Tab. 6.7 sind die Qualitätsparameter, die bei den Untersuchungen im Extensograph vom reinen WM-Mehl ermittelt wurden, übersichtlich dargestellt.

Tab.6.7: Extensogrammwerte des WM-Teigs nach 45, 90 und 135 min Ruhezeit

Probe	Einheit	WM 100 %		
		45 min	90 min	135 min
<b>DB</b>	<b>mm</b>	<b>170</b>	<b>145</b>	<b>135</b>
<b>DW</b>	<b>EE</b>	<b>460</b>	<b>515</b>	<b>560</b>
<b>DW.max</b>	<b>EE</b>	<b>520</b>	<b>568</b>	<b>600</b>
<b>DE</b>	<b>cm<sup>2</sup></b>	<b>127</b>	<b>132</b>	<b>138</b>
<b>VZ</b>		<b>2,7</b>	<b>3,6</b>	<b>4,2</b>
<b>VZ.max</b>		<b>3,1</b>	<b>3,9</b>	<b>4,4</b>

Die Ergebnisse der extensographischen Untersuchungen des WM-Mehlteigs zeigen eine optimale DB im Bereich 135...170 mm und für den DW einen Wert im Bereich von 420...520 EE. Der VZ liegt im Bereich von 2,5 - 3,9. Die DE, die Fläche von der Extensogrammkurve umschlossen wird, besitzt einen Wert im Bereich von 127...138 cm<sup>2</sup>. Der Dehnwiderstand (Kurvenhöhe) und die Dehnlänge sollten in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen. Aus der Tab. 6.7 ist zu erkennen, dass sich die DB mit zunehmender Ruhezeit verringert, während der DW einen stetigen Anstieg aufweist, was auf den erhöhten Anteil an Thiolgruppen, die beim Kneten durch die mechanische Einwirkung unter Sauerstoff oxidieren, zurückzuführen ist. Die Umsetzung von SH-Bindungen in SS-Bindungen und die neu gebildeten SS-Bindungen führten zur Verfestigung (erhöhte Elastizität) des Glutens bzw. des Teiges [74, 46]. Nahezu optimale Parameter werden gefunden.

### 6.2.2. Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktion)

Die Aufnahme des Extensogramms des Mehles aus den Kichererbsen war nicht möglich. Trotz des registrierten leichten viskoelastischen Verhaltens bei der Kriecherholungs-Messung bildeten sich beim



Kneten im Extensographen nachlassende, schmierige und klebrige Teige, die nicht zu Untersuchung im Extensographen geeignet waren.

### 6.2.3. Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl)

Mit zunehmenden KE-Anteilen in den Mischungen und damit ansteigendem Proteingehalt sowie Pentosangehalt verringert sich deutlich die DB und DW sowie die DE, was auf eine Verschlechterung der Gluteneigenschaften des Teigs hindeutet. Der höhere Proteingehalt durch die KE-Zugabe führt zur Zunahme der Elastizität (Festigkeit) des Glutens bzw. des Teiges. Eine negative Beeinflussung der Gluteneigenschaften durch die Beimischung der KE-Anteile war bereits in der Verringerung der Teigstabilität (Knetkurven) festzustellen. Die Glutenverschlechterung kann, wie bereits in den vorangegangenen Untersuchungen festgestellt, durch den erhöhten Anteil an Protein sowie Rohfaser in den Mehlen verursacht werden. Beim Kneten wird die Inkompatibilität der beiden Proteine durch die mechanische Einwirkung erhöht bzw. nicht aufgehoben, die zu einer inhomogenen Glutenkonfiguration führen kann. In der Tab. 6.8 sind die Extensogrammwerte von reinem WM-Mehl sowie den Mischungen mit KE-Anteil aufgeführt.

Tab.6.8: Extensogrammwerte der Mehlmischungen im Vergleich zum WM-Teig

Probe		WM 100 %			10 % KE			20 % KE			30 % KE		
Parameter	Einheit	45	90	135	45	90	135	45	90	135	45	90	135
		min			min			min			min		
<b>DB</b>	<b>mm</b>	<b>170</b>	<b>145</b>	<b>135</b>	<b>155</b>	<b>133</b>	<b>120</b>	<b>123</b>	<b>120</b>	<b>114</b>	<b>108</b>	<b>90</b>	<b>82</b>
<b>DW</b>	<b>EE</b>	<b>460</b>	<b>515</b>	<b>560</b>	<b>428</b>	<b>475</b>	<b>495</b>	<b>332</b>	<b>378</b>	<b>420</b>	<b>304</b>	<b>405</b>	<b>448</b>
<b>DWmax</b>	<b>EE</b>	<b>520</b>	<b>568</b>	<b>600</b>	<b>505</b>	<b>536</b>	<b>550</b>	<b>340</b>	<b>392</b>	<b>440</b>	<b>302</b>	<b>406</b>	<b>448</b>
<b>DE</b>	<b>cm<sup>2</sup></b>	<b>127</b>	<b>132</b>	<b>138</b>	<b>104</b>	<b>106</b>	<b>114</b>	<b>127</b>	<b>70</b>	<b>76</b>	<b>53</b>	<b>54</b>	<b>58</b>
<b>VZ</b>		<b>2,7</b>	<b>3,6</b>	<b>4,2</b>	<b>2,8</b>	<b>3,6</b>	<b>4,1</b>	<b>2,8</b>	<b>3,2</b>	<b>3,7</b>	<b>2,8</b>	<b>4,5</b>	<b>5,5</b>
<b>VZmax</b>		<b>3,1</b>	<b>3,9</b>	<b>4,4</b>	<b>3,3</b>	<b>4,0</b>	<b>4,6</b>	<b>2,7</b>	<b>3,3</b>	<b>3,3</b>	<b>2,8</b>	<b>4,5</b>	<b>5,5</b>

Aus der Tab. 6.8 ist zu erkennen, dass der DW einen zeitabhängigen Anstieg aufweist und mit der Ruhezeit deutlich zunimmt, was durch die Dominanz des Weizenproteinanteils in den Mehlmischungen hervorgerufen wird. Mit zunehmender KE-Konzentration in den Mehlmischungen verringern sich deutlich sämtliche Extensogrammwerte, insbesondere ab 20 % KE-Mehl, was in den Verarbeitungseigenschaften des Teigs deutlich bemerkbar wird. Verallgemeinert kann ausgeführt werden, dass die Veränderung der Dehnungseigenschaften der Teige mit der gemessenen Abnahme der Deformierbarkeit des Glutennetzwerkes und mit den KE-Anteilen korreliert. Eine Abnahme der DB sowie der DE wurde auch von Abdel-Kader (2000) bestätigt, so dass sich beide Parameter mit der zunehmendem Bohnenanteil von 5, 10, 15 und 20 % in den Mischungen mit WM-Mehl deutlich verringert. Dadurch verringert sich die Teiggärtoleranz ebenfalls [125]. Durch die KE-Zugabe findet in allen Fällen eine Schwächung der Strukturausbildungen im Teig (im Vergleich mit Weizen) statt. Trotz einer Erhöhung des Gluteninanteils werden höhere viskose Anteile ermittelt. Offensichtlich überlagern viskositätsausgebildene

Pentosaninteraktionen die Teigstrukturausbildung und negieren Globulinwirkungen. Diese Ergebnisse werden bei den Farinogramm- wie auch Extensogrammmessungen stets gefunden.

#### 6.2.4. Mischungen der Kichererbsenfraktion F1, F2 und F3

In den Tab. 6.9, 6.10 und 6.11 sind die Extensogrammwerte von reinem WM-Mehl sowie deren Mischungen mit KE-Fractionen aufgeführt.

Tab.6.9: Extensogrammwerte der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F1)

Probe		WM 100 %			10 % F1			20 % F1			30 % F1		
Parameter	Einheit	45	90	135	45	90	135	45	90	135	45	90	135
		min			min			min			Min		
DB	mm	170	145	135	153	142	137	138	136	128	132	123	104
DW	EE	460	515	560	474	510	586	320	386	422	302	330	390
DWmax	EE	520	568	600	510	590	690	364	410	478	318	350	422
DE	cm <sup>2</sup>	127	132	138	121	131	142	73	88	95	61	70	82
VZ		2,7	3,6	4,2	3,1	3,6	4,3	2,3	2,8	3,3	2,3	2,7	3,7
VZmax		3,1	3,9	4,4	3,3	4,2	5,0	2,6	3,0	3,7	2,4	2,9	4,0

Tab.6.10: Extensogrammwerte der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F2)

Probe		WM 100 %			10 % F2			20 % F2			30 % F2		
Parameter	Einheit	45	90	135	45	90	135	45	90	135	45	90	135
		min			min			min			min		
DB	mm	170	145	135	150	139	133	124	114	117	132	110	102
DW	EE	460	515	560	410	500	510	358	450	534	218	272	340
DW. max	EE	520	568	600	468	558	585	370	466	568	220	272	344
DE	cm <sup>2</sup>	127	132	138	114	125	129	71	78	99	41	47	56
VZ		2,7	3,6	4,2	2,7	3,6	3,8	2,9	3,9	4,6	1,7	2,5	3,3
VZ. Max		3,1	3,9	4,4	3,1	4,0	4,4	3,1	4,1	4,9	1,7	2,5	3,4

Tab.6.11: Extensogrammwerte der Fraktionsmischungen (10, 20 und 30 % F3)

Probe		WM 100 %			10 % F3			20 % F3			30 % F3		
Parameter	Einheit	45	90	135	45	90	135	45	90	135	45	90	135
		min			min			min			min		
DB	mm	170	145	135	138	134	131	116	122	116	105	107	100
DW	EE	460	515	560	372	470	490	322	530	585	225	285	335
DW. max	EE	520	568	600	410	526	542	340	582	630	255	285	335
DE	cm <sup>2</sup>	127	132	138	82	104	112	61	106	111	40	47	52
VZ		2,7	3,6	4,2	2,7	3,5	3,7	4,4	4,4	5,1	2,4	2,7	3,4
VZ. Max		3,1	3,9	4,4	2,8	3,9	4,3	4,4	4,8	5,5	2,4	2,7	3,4

Die Extensogrammwerte weisen auf wesentliche Veränderungen der Dehneigenschaften des Glutens in Abhängigkeit von den Partikelgrößen sowie von der Fraktionskonzentration hin. Die dargestellten Tabellen charakterisieren die möglichen Qualitätsunterschiede aus den Fraktionsmehlmischungen und geben damit

erste Hinweise auf zu erwartende Unterschiede im Backverhalten. Besonders deutlich sind die mit „Dehnungsenergie“ bezeichneten Unterschiede in den Flächen unter den Dehnungskurven im Extensogramm der Fraktionen bei 30 %. Die im Extensogramm erfassten Verhältniszahlen deuten für die Fraktionsmischungen mit 30 % auf eine gewisse „Kürze“ in den viskoelastischen Teigeigenschaften hin. Wie bei der Mehlmischungen sind hier auch deutlich zu erkennen, dass sich die Extensogrammswerte mit zunehmenden Fraktionsanteilen in den Mehlmischungen verringern. Dahingegen weist die DB bei jeder Mischung eine leichte zeitabhängige Abnahme auf, während die DE und der DW deutliche zeitabhängige Zunahme aufzeigt. Die DB eines Teiges korreliert besser mit dem Gluteningehalt im Mehl, insbesondere nach längerer Teigruhe von 90 bzw. 135 min [97]. Anhand der eigenen Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass mit steigendem KE-Anteil sowohl bei Vollkornmehl als auch bei den Mehlfractionen, trotz des erhöhten Gluteninegehaltes aufgrund des steigenden Pentosangehaltes, die Abnahme der Dehnbarkeit resultiert. Über die Wechselwirkungen der Pentosane mit den übrigen Mehlbestandteilen ist relativ wenig bekannt. Es wird am Beispiel der eigenen Messdaten festgestellt, dass der Einfluss der Pentosane beim Einteigen in Abhängigkeit von Konzentration und Partikulierung einen erheblichen Einfluss besitzt.

### 6.3. Micro Visco-Amylo-Graph Untersuchungen

Die funktionellen Eigenschaften der Stärke in Hinblick auf ihre Verarbeitung zu Backwaren und Nahrungsmitteln beruhen auf komplexen Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Stärkekomponten und dem Wasser. Zu den wichtigsten Eigenschaften der Stärke zählen die Verkleisterung, Viskositätsausbildung, Retrogradation und die Xerogelbildung nach der Abkühlung.

Diese Eigenschaften werden von mehreren Faktoren beeinflusst. Unter anderem kann die Art und der Umfang der Stärkebeschädigung durch die Vermahlung beeinflusst werden.

#### 6.3.1. Vergleich von Weizen- und Kichererbsenmehl (Gesamtfraktion)

In Abb. 6.8 sind die Viscogramm-Kurvenverläufe des WM- und KE-Mehl dargestellt.

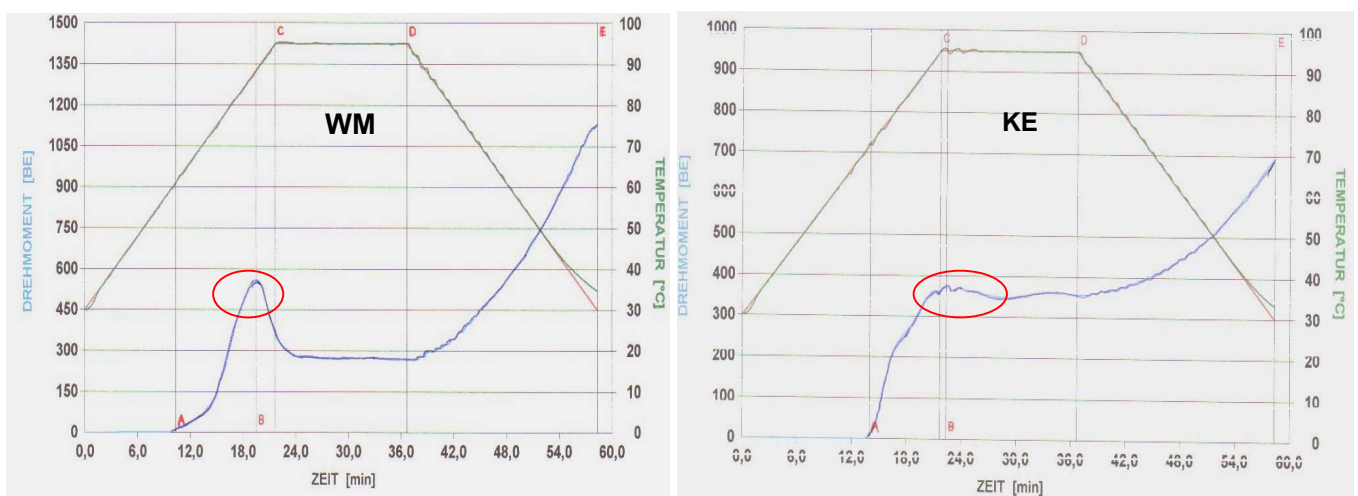


Abb. 6.8: Beispielhafter Vergleich zwischen Viscogramm mit WM- und mit KE-Mehl

Aus der Abb.6.8 ist deutlich zu erkennen, dass die Kurvenverläufe von Weizen- und KE-Mehl einen erheblichen Unterschied aufweisen. Der Kurvenverlauf des Viscogramms beim WM-Mehl zeigt deutlich einen Peak der maximalen Viskosität. Beim KE-Mehl ist kein Peak, sondern ein bereiter Verlauf ausgeprägt, was auf den Widerstand der KE-Stärkekörner gegen die Fragmentierung und die Quellung während des Rührens und die Erwärmung zurückzuführen ist und bestätigt die Aussagen von [126]. Die Stärke ist im Allgemeinen in Wasser fast unlöslich. Diese liegt am Aufbau der Stärke. Das unlösliche Amylopektin umgibt die lösliche Amylose. Beim Erhitzen des Wassers auf 40 °C bis 60 °C quillt die Stärke jedoch auf, da die äußeren Schichten aufplatzen. Während der Quellung nimmt das Volumen des Stärkekornes stark zu, da diese viel Wasser infolge der Desintegration aufnimmt. Wird das Wasser weiter bis zu einer Temperatur von 55 °C bis 87 °C erhitzt, verkleistert die Stärke. Das bedeutet, dass die Struktur sich noch weiter auflöst und das Wasser sich in den entstandenen Zwischenräumen einlagert. Die Löslichkeit der KE-Stärke erhöht sich mit steigenden Temperaturen bis ca. 85 °C.

Bei weiteren steigenden Temperaturen bis 90 °C kommt es zu einer Abnahme. Ein möglicher Grund für die Abnahme der Löslichkeit mit steigender Temperatur in KE-Stärke ist, dass die verkleisterte Stärke das Auflösen vom löslichen Bestandteile ins Wasser infolge höherer Viskosität verhindern kann [36]. In der Tab. 6.12 sind die erfassten Viscogrammswerte von reinen WM- und KE-Mehl zusammengestellt.

Tab.6.12: Stärkeeigenschaften des Weizen- und Kichererbsenmehls

Probe	Einheit	Verkleisterungsbeginn		Maximale Viskosität		Viskosität Beginn der Kühlphase BE	Kaltviskosität Ende 30 °C BE
		Zeit min	Temperatur °C	Viskosität BE	Temperatur °C		
<b>WM</b>		<b>10,2</b>	<b>60,8</b>	<b>560</b>	<b>88,3</b>	<b>267</b>	<b>1132</b>
<b>KE</b>		<b>14,0</b>	<b>72,0</b>	<b>379</b>	<b>95,2</b>	<b>356</b>	<b>694</b>

Nach Tab. 6.12 ist festzustellen, dass der Verkleisterungsprozess bei KE im Vergleich zum WM 4 min später eingetreten ist. Die Temperatur des Verkleisterungsbeginns für Kichererbsenstärke begann mit 72 °C um 11 K höher als beim WM, was auf einen deutlichen Einfluss der Art der botanischen Herkunft und zunächst der Partikelgrößen des Mehls auf die Verkleisterung hindeutet. Das WM-Mehl besitzt eine feinere Partikulierung im Vergleich zum KE-Mehl und dadurch einen höheren Anteil an beschädigten Stärkekörnern. Das ermöglicht eine schnellere Angreifbarkeit der Stärke und damit ihren schnelleren Abbau durch die mehleigene Amylase während des Rührprozesses und der Erwärmung. Es ist auch zu vermuten, dass durch den Vermahlungsprozess von Kichererbsen in der Hammermühle geringere Anteile an Stärkekörnern aus der Proteinmatrix herausgelöst wurden. Dies kann auch mit Stärkebeschaffenheit (Stärkekorngroße, mechanische Stärkebeschädigung, kristalliner Zustand und das Amylose-Amylopektin-Verhältnis) sowie der differenzierten  $\alpha$ -Amylaseaktivität zusammenhängen. Obwohl die rheologischen Veränderungen der Mehlsuspension im MVAG in erster Linie auf die Stärkebeschaffenheit der Mehle zurückzuführen sind, können die im Mehl vorhandenen Proteine und anderen Mehlkomponenten die

rheologischen Eigenschaften der Mehlsuspension ebenfalls beeinflussen [127, 40]. So weist das KE-Mehl mit 379 BE eine um 181 BE geringere maximale Viskosität als WM-Mehl auf, was auf den höheren Proteingehalt mit 28,48 % sowie geringeren Stärkgehalt mit 51,2 % zurückzuführen ist. Diese Ergebnisse stimmen mit der Aussagen in der Literatur überein [128, 129]. Z. B. schränken die vorhandenen Proteine im Reismehl die Quellung der Stärkekörner ein und reduzieren die Viskositätsentwicklung. Dabei bewirkt die Entfernung der Proteine einer Zunahme der Viskosität der Stärke. Ein höherer Lipidgehalt der KE von 4,99 % kann auch zu einer Abnahme der Viskositätsfunktion durch Bildung von Lipid-Amylosen-Komplexen führen [130]. Aus der Tab. 6.12 ist auch zu erkennen, dass das WM-Mehl mit 1132 BE eine um 438 BE höhere Kaltviskosität als KE-Mehl aufweist, was deutlich auf das Amylose-Amylopektin-Verhältnis im WM-Mehl mit 20 % - 80 % und im KE-Mehl mit 40 % - 60 % nachzuweisen ist.

### 6.3.2. Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl)

Wesentlich sind zunächst die Untersuchungen der Stärkeeigenschaften im MVAG. Neben den Heiß- und Kaltviskositäten der Stärke im Mehl wird auch die Verkleisterungstemperatur erfasst, um den Einfluss des zunehmenden KE-Anteils in den Mischungen auf die Stärkeeigenschaften zu ermitteln.

Infolge zunehmender KE-Anteile änderten sich die Verkleisterungscharakteristika der Mischungen deutlich.

Tab.6.13: Stärkeeigenschaften der Mehlmischungen im Vergleich mit WM- und KE-Mehl

Probe	Einheit	Verkleisterungsbeginn		Maximale Viskosität		Viskosität Beginn der Kühlphase	Kaltviskosität Ende 30 °C
		Zeit min	Temperatur °C	Viskosität BE	Temperatur °C		
<b>WM</b>		<b>10,2</b>	<b>60,8</b>	<b>560</b>	<b>88,3</b>	<b>267</b>	<b>1132</b>
<b>10 % KE</b>		<b>10,5</b>	<b>62,0</b>	<b>468</b>	<b>80,9</b>	<b>264</b>	<b>724</b>
<b>20 % KE</b>		<b>11,4</b>	<b>64,6</b>	<b>444</b>	<b>80,0</b>	<b>283</b>	<b>705</b>
<b>30 % KE</b>		<b>12,2</b>	<b>66,5</b>	<b>466</b>	<b>79,6</b>	<b>297</b>	<b>758</b>
<b>KE</b>		<b>14,0</b>	<b>72,0</b>	<b>379</b>	<b>95,2</b>	<b>356</b>	<b>694</b>

Eine Zunahme der Verkleisterungsbeginnstemperatur der Mehlmischungen wird festgestellt, ebenso ein Rückgang der Heiß- sowie Kaltviskositäten. Daraus geht hervor, dass die Kleister der Mehlmischungen mit zunehmender KE-Konzentration weniger zur Gelbildung neigen. Der Viskositätsverlust des Kleisters ist ebenfalls wichtiges Qualitätsmerkmal der Stärke. Er fällt bei den Mehlen mit den steigenden Kichererbsenanteilen geringer aus. Niedrigere Viskositätsverluste deuten auf eine bessere Hitzestabilität hin. Im Vergleich zum WM ergeben sich für die maximale Viskosität und Verkleisterungsbeginnstemperatur wesentliche Veränderungen mit Erhöhung der KE-Anteile in den Mischungen. So liegt die Starttemperatur der Verkleisterung bei der Mischung von 10 % um 2 K höher und bei 20 % um 4 K, sowie bei 30 % um 6 K. Auffällig ist aus der Tab. 6.13, dass die Temperatur der maximalen Viskosität mit der Zugabe der KE-Anteile eine deutliche Verringerung aufweist, was auf einen erhöhten Proteingehalt im System zurückzuführen ist. Interessant ist der geringe Viskositätsverlust der Mehlmischungen untereinander.

### 6.3.3. Kichererbsenfraktion F1

In Abb. 6.9 ist das Viscogramm der reinen Kichererbsenfraktion F1 dargestellt.

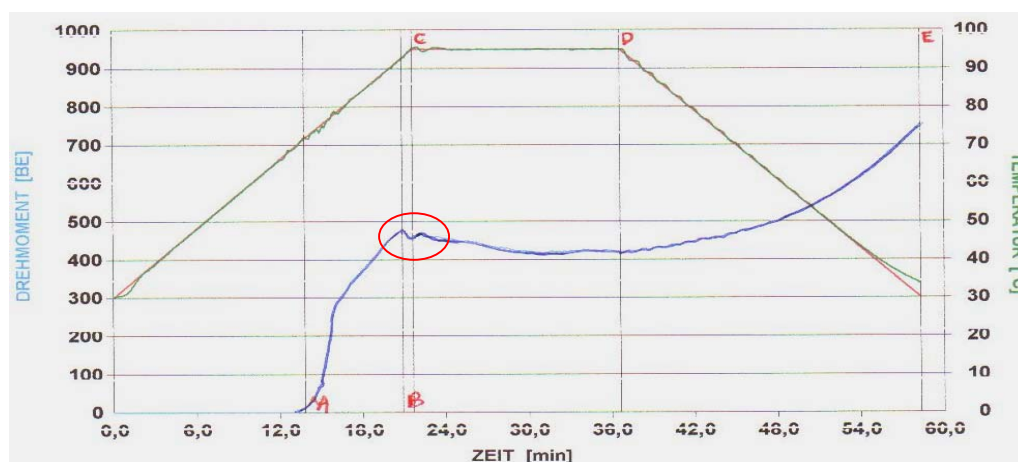


Abb.6.9: Viscogrammskurve der reinen Fraktion F1

Aus der Abb. 6.9 ist zu erkennen, dass sich die feinste Fraktion F1 ähnlich wie die reinen Kichererbsen verhält. Ein kleiner Peak der Viskosität wird ermittelt, was auf feine Partikulierung der Fraktion F1 und dadurch kleinere Stärkekörnern zurückgeführt werden kann. Dabei wird eine Verkleisterungstemperatur von 72 °C ermittelt, die erst nach 13,5 min Zeitverzögerung eintritt. Eine maximale Viskosität von 480 BE bei einer Temperatur von 92,6 °C wird nachgewiesen. Im Vergleich zum WM zeigt die reine Fraktion F1 eine höhere Verkleisterungstemperatur um 11,2 K, sowie eine geringfügige Verringerung der Viskosität um 80 BE, was aus materialwissenschaftlicher Sicht dem Weizen am ähnlichsten einzuschätzen ist. Die Verkleisterungstemperatur nimmt mit der Erhöhung der KE Fraktionsanteile in den Mischungen zu und steigt bei der Mischung von 10 % um 1,7 K sowie bei der Mischung von 20 % um 4,1 K und bei der Mischung von 30 % um 5,8 K. Damit zeigt die Mischung von 30 % F1 im Vergleich zum Weizen den größten Unterschied der Verkleisterungstemperaturen. Interessant ist der geringe Viskositätsverlust der Mischungen untereinander sowie eine geringere Kaltviskosität, welche bei der Zugabe festgestellt worden. So verringerte sich die Kaltviskosität der Fraktionsmischungen um etwa 410 BE gegenüber dem WM-Mehl. Die Viscogrammwerte, die in der Tab. 6.14 aufgeführt wurden, verdeutlichen die Beobachtungen.

Tab.6.14: Stärkeeigenschaften der Kichererbsenfraktion F1

Probe	Einheit	Verkleisterungsbeginn		Maximale Viskosität		Viskosität Beginn der Kühlphase	Kaltviskosität Ende 30 °C
		Zeit min	Temperatur °C	Viskosität BE	Temperatur °C		
<b>WM</b>		<b>10,2</b>	<b>60,8</b>	<b>560</b>	<b>88,3</b>	<b>267</b>	<b>1132</b>
<b>10 % F1</b>		<b>10,6</b>	<b>62,5</b>	<b>467</b>	<b>81,8</b>	<b>261</b>	<b>709</b>
<b>20 % F1</b>		<b>11,5</b>	<b>64,9</b>	<b>477</b>	<b>79,8</b>	<b>287</b>	<b>758</b>
<b>30 % F1</b>		<b>12,2</b>	<b>66,6</b>	<b>476</b>	<b>78,8</b>	<b>311</b>	<b>734</b>
<b>F1</b>		<b>13,5</b>	<b>72,0</b>	<b>480</b>	<b>92,6</b>	<b>419</b>	<b>755</b>
<b>KE</b>		<b>14,0</b>	<b>72,0</b>	<b>379</b>	<b>95,2</b>	<b>356</b>	<b>694</b>

### 6.3.4. Kichererbsenfraktion F2

In Abb. 6.10 ist das Viscogramm der reinen Fraktion F2 dargestellt.

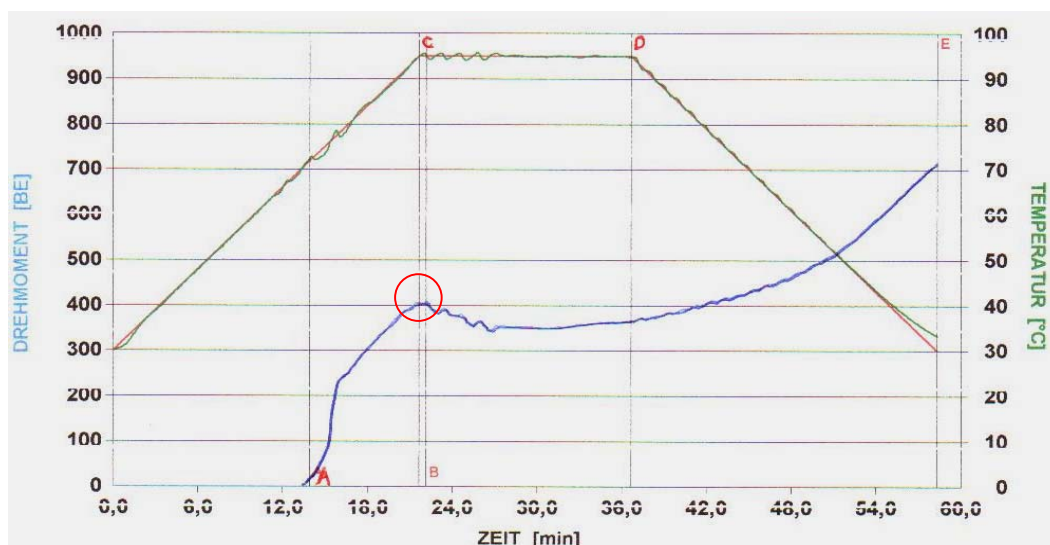


Abb.6.10: Viscogrammskurve der reinen KE-Fraktion F2

Erwartungsgemäß verhält sich die Messkurve der mittleren Fraktion der KE ähnlich wie die Fraktion F1. Das Verkleisterungsmaximum liegt bei 409 BE, damit um 151 BE geringer als beim WM-Mehl.

Die Verkleisterungstemperatur liegt mit 72,3 °C um 11,5 K höher als beim WM-Mehl. Im Vergleich zum WM-Mehl verringern sich die maximale Viskosität, sowie die Kaltviskosität mit zunehmender Fraktion F2 in den Mischungen, was auf eine erhöhte Proteinmenge im System hinweist. Hingegen steigen die Verkleisterungstemperaturen mit erhöhten KE-Fraktion F2 um 4,7 K bei der Mischung von 30 % an.

Tab.6.15: Stärkeeigenschaften der Kichererbsenfraktion F2

Probe	Einheit	Verkleisterungsbeginn		Maximale Viskosität		Viskosität Beginn der Kühlphase BE	Kaltviskosität Ende 30 °C BE
		Zeit min	Temperatur °C	Viskosität BE	Temperatur °C		
WM		10,2	60,8	560	88,3	267	1132
10 % F2		11,0	62,8	451	81,3	279	742
20 % F2		11,4	64,5	464	80,50	293	801
30 % F2		11,6	65,5	467	79,5	301	774
F2		13,6	72,3	409	95,2	365	715
KE		14,0	72,0	379	95,2	356	694



### 6.3.5. Kichererbsenfraktion F3

In Abb. 6.11 ist das Viscogramm der reinen Fraktion F3 dargestellt.

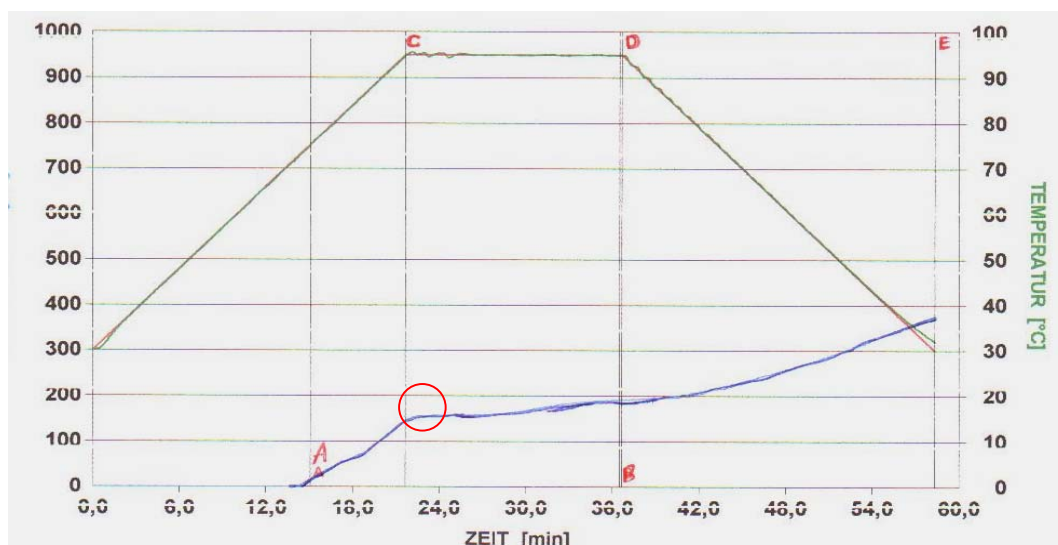


Abb.6.11: Viscogrammskurve der reinen KE-Fraktion F3

Einen deutlichen Einfluss der Partikulierung auf die Verkleisterungseigenschaften der Stärke wurde bei der größeren Fraktion F3 festgestellt. Die Kurve des Viscogramms zeigt einen flachen Verlauf und keinen ausgeprägten Peak, was auf geringere Anteile der Stärkekörner, die aus der verkitteten Proteinmatrix gelöst wurden, hinweist. Die Verkleisterung der Stärke tritt erst nach 15,05 min auf. Erwartungsgemäß liegt die maximale Viskosität der Fraktion F3 auf einem niedrigen Niveau. Das Verkleisterungsmaximum und die Kaltviskosität zeigen die größten Veränderungen im Vergleich zum WM-Mehl. Die höchste Verkleisterungstemperatur wurde bei der Fraktion F3 mit 75,2 °C festgestellt. Eine Erhöhung der Partikelgröße verursacht eine logische Zunahme der Verkleisterungstemperatur (stationäre Wärmeleitung). Mit steigendem Fraktionsanteil F3 in den Mischungen verringern sich die Viskositätsdaten.

Tab.6.16: Stärkeeigenschaften der Kichererbsenfraktion F3

Probe	Einheit	Verkleisterungsbeginn		Maximale Viskosität		Viskosität Beginn der Kühlphase BE	Kaltviskosität Ende 30 °C BE
		Zeit min	Temperatur °C	Viskosität BE	Temperatur °C		
WM		10,2	60,8	560	88,3	267	1132
10 % F3		11,3	64,0	429	81,4	268	678
20 % F3		11,4	64,9	419	80,9	270	739
30 % F3		14,3	73,0	370	81,4	237	729
F3		15,1	75,2	192	94,9	192	377
KE		14,0	72,0	379	95,2	356	694



### 6.3.6. Vergleich der reinen Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3

In der Tab. 6.17 sind die Verkleisterungseigenschaften des WM-Mehls und der KE-Fraktionen dargestellt.

Tab.6.17: Stärkeeigenschaften der reinen Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3

Probe	Einheit	Verkleisterungsbeginn		Maximale Viskosität		Viskosität Beginn der Kühlphase BE	Kaltviskosität Ende 30 °C BE
		Zeit min	Temperatur °C	Viskosität BE	Temperatur °C		
<b>WM</b>		<b>10,2</b>	<b>60,8</b>	<b>560</b>	<b>88,3</b>	<b>267</b>	<b>1132</b>
<b>KE</b>		<b>14,0</b>	<b>72,0</b>	<b>379</b>	<b>95,2</b>	<b>356</b>	<b>694</b>
<b>F1</b>		<b>13,5</b>	<b>72,0</b>	<b>480</b>	<b>92,6</b>	<b>419</b>	<b>755</b>
<b>F2</b>		<b>13,6</b>	<b>72,3</b>	<b>409</b>	<b>95,2</b>	<b>365</b>	<b>715</b>
<b>F3</b>		<b>15,1</b>	<b>75,2</b>	<b>192</b>	<b>94,9</b>	<b>192</b>	<b>377</b>

Mit der Änderung der Partikelgrößen geht ebenfalls eine Änderung der Verkleisterungseigenschaften der Stärke im MVAG einher. Mit steigender Partikelgröße verringern sich die Verkleisterungsmaxima. Eine geringfügige Zunahme der Verkleisterungstemperatur um 0,3 K wurde im MVAG für Fraktion F2 im Vergleich zur Fraktion F1 festgestellt. Dagegen zeigt die Fraktion F3 eine deutliche Zunahme der Verkleisterungstemperatur um 3,2 K. Im Vergleich zum WM zeigen die KE-Fraktion eine Verzögerung der Startzeit der Verkleisterung durchschnittlich um 4 min sowie eine erhebliche Zunahme der Verkleisterungstemperatur um ca. 10 K, was deutlich auf unterschiedliche Stärkeeigenschaften des WM- und KE-Fraktionsmehls und damit Stärkekorngröße, Wasserbindungsvermögen und Interaktionen mit anderen Mehlbestandteil zurückzuführen ist.

Es zeigte sich, dass die Fraktion F1 eine deutlich höhere Viskosität liefert als die mittlere und grobe Fraktion, was auf einen höheren Anteil der mechanisch beschädigten Stärkekörner sowie größere spezifische Oberfläche der feinen Fraktion im Vergleich zu anderen Fraktionen zurückzuführen ist. Bei kleinem Durchmesser der Körner steigt die Gesamtoberfläche an. Dadurch besteht eine bessere Möglichkeit der Wasseraufnahme (Quellung). Kein Peak der Viskosität ist bei den KE-Fraktionen zu erkennen, was auf den Widerstand der Stärke gegen Fragmentierung und Quellung während des Rührens und der Erwärmung zurückzuführen ist. Die Fraktion F3 hat insgesamt niedrigere Viskositäten als die Fraktion F1 und F2. Die Viskositätseigenschaften der Fraktionen stehen im festen Zusammenhang mit der Partikelgröße, dem Stärkebeschädigungsgrad und dem Wasserbindevermögen.

Erwartungsgemäß wurden bei der gröberen Fraktion die niedrigeren Werte der Verkleisterungsmaxima und der Kaltviskositäten beobachtet. Dies wird auf einen verschlechterten Wasserzugang und einen durch unvollständigere Hydratisierung höheren Widerstand zur Fragmentierung und Quellung der Stärkekörner zurückgeführt. Durch die Verschiebung des Verhältnisses der Mehlkomponenten Protein und Stärke sowie des Anteils beschädigter Stärkekörner unterschieden sich die Viskositäten der feinen und groben Fraktionen deutlich.

Daher wurde eine Abnahme der Verkleisterungsmaxima und der Kaltviskositäten bei den Grobfractionen, bzw. eine Zunahme der Verkleisterungstemperatur im Vergleich zu WM-Mehl beobachtet.

#### **6.4. Kapitelzusammenfassung**

Die Ergebnisse der konventionellen teigrheologischen Untersuchungen am Beispiel von Farinograph- und Extensographuntersuchungen dienen vorrangig der Bewertung der Proteineigenschaften der eingesetzten Mehle bzw. Mehlmischungen. Bereits hier werden eindeutige Unterschiede zwischen WM- und KE-Mehl festgestellt. Ein reiner KE-Teig kann mittels Farinographuntersuchung nur bedingt ausgewertet werden.

Die untersuchten Mehlmischungen 10, 20 und 30 % KE-Mehlanteil weisen am Beispiel der untersuchten Kennwerte Teigkonsistenz, Wasseraufnahme, Teigentwicklungszeit, Teigstabilität und Teigerweichung ein intermediäres Verhalten nach. Die konventionelle Weizenanalytikauswertung ist möglich. Als Ursache kommen wahrscheinlich das veränderte Wasserbindevermögen und die Struktur-Texturausbildung als interne Antagonisten in Frage. Die weiter durchgeführten Fraktionsmessungen weisen partikulierungsbedingt erhebliche Abweichungen untereinander auf. Bereits bei 30 % Zumischung von F1 als am höchsten mechanisch aufgeschlossenem Mehl wird der typische Messverlauf eines Weizenmehls verlassen. Sämtliche Ergebnisse liegen numerisiert in tabellarischer Form vor. Analoge Aussagen gelten für die Extensograph-Untersuchungen.

Die Verformbarkeit des Teiges wird durch KE-Anteile verschlechtert. Untersuchungen zu den Verkleisterungseigenschaften mittels MVAG-Untersuchungen beenden das Kapitel. Auch hier werden große Unterschiede zwischen den Einsatzkomponenten und den Mischungen festgestellt. Generell wird eine Zunahme der Verkleisterungstemperatur und Verkleisterungszeit der Mehlmischungen als Einfluss der KE-Stärke ermittelt. Anhand der Ergebnisse der konventionellen Teiguntersuchungen kann eine Bestätigung der Literaturergebnisse vorgenommen werden. Mit zunehmender KE-Konzentration und verringertem mechanischem Aufschluss sinkt die viskoelastische Relation und damit das Verarbeitungsverhalten, was vorzugsweise mit dem Abbau des Glutennetzwerks infolge des Vorhandenseins nicht kompatibler Proteine begründet werden kann. Die Fraktion F2 erscheint hier dem Weizenteig am nächsten, siehe auch Punkt 7.

Die festgestellten homogenen Partikeleigenschaften zwischen WM und KE aus Kapitel. 5 verlieren hier an Bedeutung. Neben der Proteinkompatibilität scheinen Fraktionierungen ebenfalls von Bedeutung für die Teigstrukturausbildung, vorzugsweise am Beispiel der Fraktion F3, die sich als Singularität abbildet.

## 7. Fundamentale rheologische Untersuchungen

Ziel der nachstehenden Untersuchungen war die Überprüfung der Ergebnisse aus dem Kapitel 6 durch moderne rheologische Messverfahren. Zur Anwendung kommen Oszillationsmessungen mit Luftlagertechnik zur Strukturuntersuchung in der Mikrostrukturebene und Kriechversuche, die für die Teigbewertung von Bedeutung sind.

### 7.1. Oszillationsmessungen

Nachstehend wird der native Strukturierungszustand des Teigs durch zerstörungsfreie Messungen im Rahmen des linear-viskoelastischen Bereiches (LVB)  $\gamma < \gamma_{krit}$  durchgeführt und beschrieben.

#### 7.1.1. Amplitudensweepmessungen

Der Amplitudensweep wird eingesetzt, um den linear viskoelastischen Bereich der Matrix zu ermitteln.

##### 7.1.1.1. Weizen- und Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktion)

Nachfolgend werden die Ergebnisse der fundamentalen rheologischen Untersuchungen von WM- und KE-Teig aufgeführt.

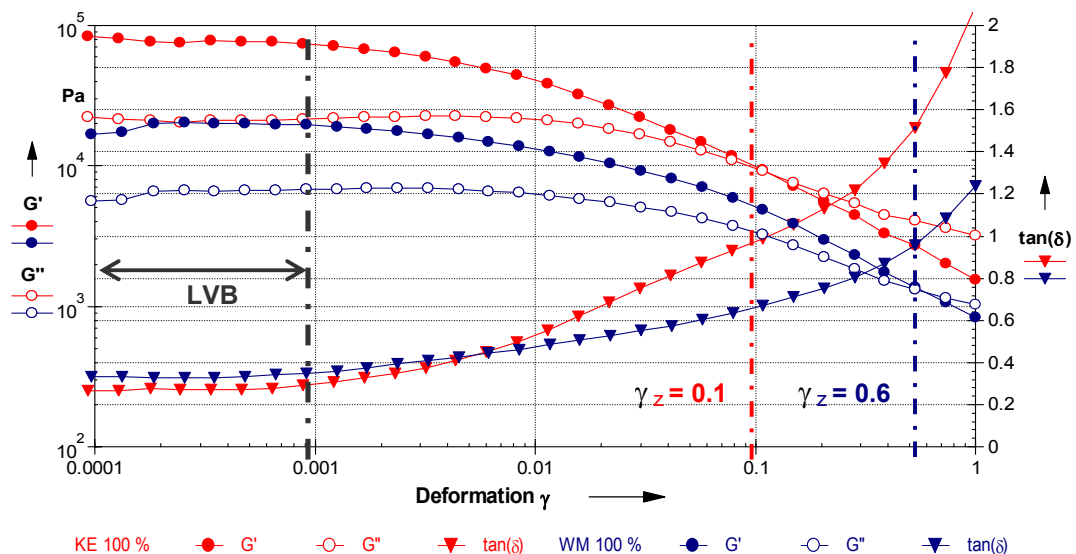


Abb. 7.1: Amplitudensweep Vergleich Weizen- und Kichererbsenteig

In Abb. 7.1 erfolgt eine Zusammenstellung von Speicher- und Verlustmodul sowie Verlustfaktor für KE-Teig im Vergleich mit WM-Teig. In der doppeltlogarithmischen Darstellung des deformationsabhängigen Verhaltens der untersuchten Teige ist ein ausgeprägter LVB mit dominantem Festkörperverhalten ( $G' > G''$  bzw. Verlustfaktor  $< 1$ ) zu erkennen, gefolgt von einem Abfall beider Moduli und einem Anstieg des Verlustfaktors mit Strukturumbruch ( $\tan \delta = 1$ ). Die Gesamtstruktur bzw. Makrostruktur erfährt einen „break down“, wird also vollständig zerstört. Eine Unterstruktur liegt nicht vor. Die Zerstörungsdeformation  $\gamma_z$  mit  $G' = G''$  liegt bei WM-Teig bei 0,6; bei KE-Teig bei 0,1. Der Verlauf der Messkurven zeigt einem linear-viskoelastisches Verhalten im Bereich  $10^{-4} \leq \gamma \leq 10^{-3}$ . Für die Durchführung des Frequenzsweeps erfolgt

die Festlegung der Grenze des LVB mit  $\gamma = 10^{-3}$ . Im Vergleich zum WM-Teig ist festzustellen, dass es trotz des höheren Proteingehaltes, der höheren Strukturlevel und der relativ größere Partikulierung bei KE-Teig schneller zu einer Strukturinstabilität des Teigs kommt, erkennbar am Verlaufs des  $\tan \delta$ . In Tab. 7.1. sind aus der Abb. 7.1 entnommene Oszillationskennwerte zusammengestellt.

Tab. 7.1: AS-Messung Vergleich Weizen- und Kichererbsenteig

Deformation	Probe	$G'$ $10^4$ Pa	$G''$ $10^4$ Pa	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4$ Pa · s	$ G^* $ $10^4$ Pa
$\gamma = 10^{-3}$	WM	1,90	0,7	0,36	0,32	2,0
	KE	7,20	2,2	0,31	1,20	7,5

Die Moduli von KE-Teig liegen um 3-fach höher als bei dem WM-Teig. Diese höhere Festigkeit/Steifigkeit resultiert im Wesentlichen aus den bei KE-Teig vorliegenden unvernetzten Stärkepartikeln, die als Dispersion mit Punktkontakt vorliegen und kein interagierendes Netzwerk bilden. Von Interesse ist der Verlauf des  $\tan \delta$ . Eindeutig liegt bei WM-Teig mit 0,36 eine bekannte **viskoelastische** Relation im Vergleich zu KE-Teig mit 0,31 (mehr **viskoelastisch**, fester, steifer und spröder) als Materialeigenschaften vor.

#### 7.1.1.2. Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl)

Nachfolgend wird der Einfluss des KE-Zusatzes in drei unterschiedlichen Mischverhältnissen auf die rheologischen Eigenschaften des WM-Teigs untersucht.

In Abb. 7.2 erfolgt eine Zusammenstellung von Speichermodul und  $\tan \delta$  der drei Teigpräparationen im Vergleich zum WM-Teig und KE-Teig.

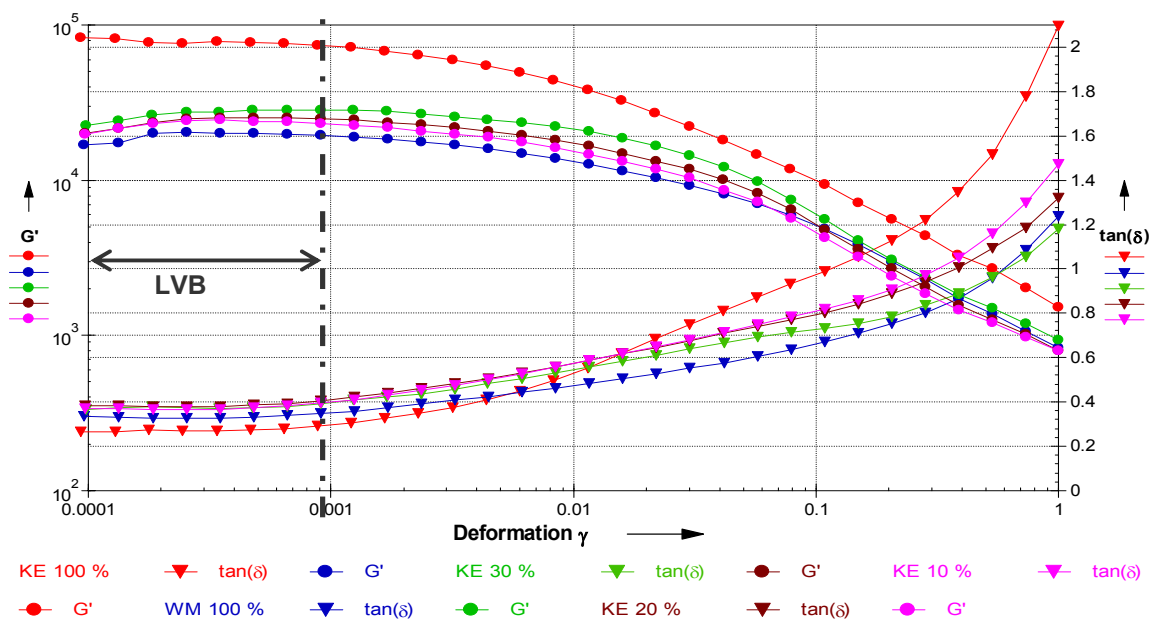


Abb. 7.2: Amplitudensweep der Mehlmischungen (10 %, 20 % und 30 % KE)

Das Speicher- und Verlustmodullevel der Mehlmischungen untereinander weist geringere Unterschiede im Vergleich zum WM-Teig auf. Ein LVB für die Mischungen wurde bei Deformation von  $10^{-4} \leq \gamma \leq 10^{-3}$  festgestellt. In Tab. 7.2 Erfolgt eine Formalisierung der Messdaten der Abb. 7.2.

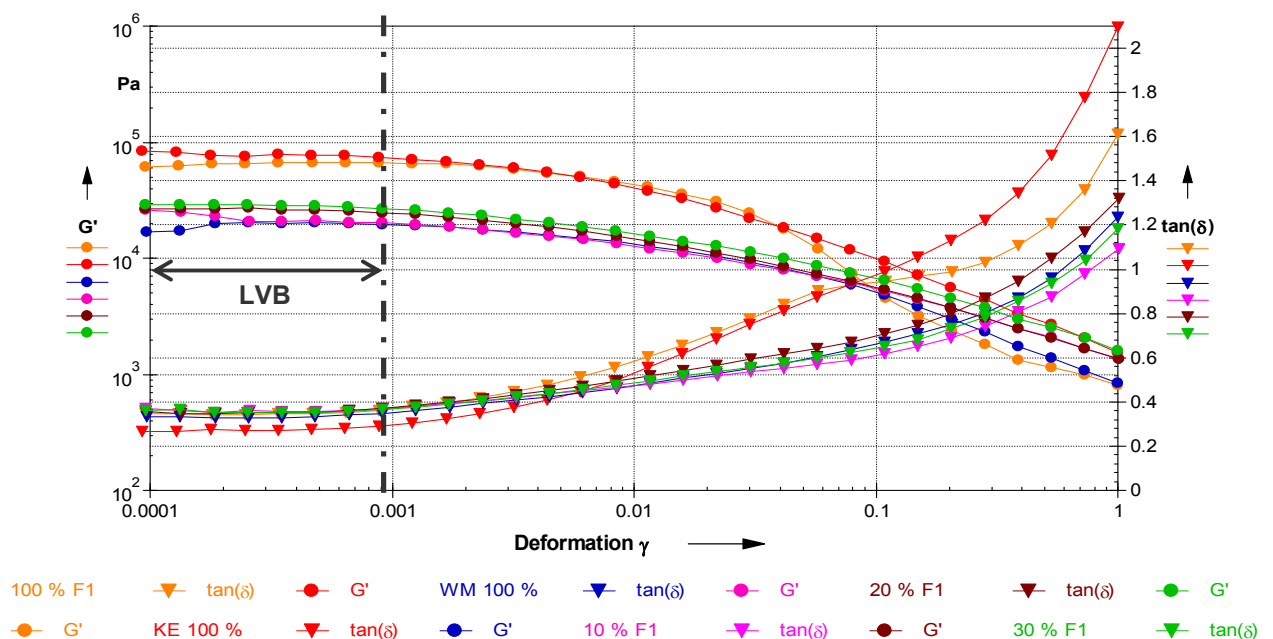
Tab. 7.2. AS-Messung Mehlmischungen im Vergleich zum WM-Teig

Deformation	Probe	$G'$ $10^4$ Pa	$G''$ $10^4$ Pa	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4$ Pa·s	$ G^* $ $10^4$ Pa
$\gamma = 10^{-3}$	WM	1,90	0,70	0,36	0,32	2,00
	10 % KE	2,30	0,93	0,41	0,39	2,50
	20 % KE	2,50	1,04	0,42	0,43	2,70
	30 % KE	2,80	1,20	0,41	0,49	3,10
	KE	7,20	2,20	0,31	1,20	7,50

Aus der Tab.7.2 ist zu erkennen, dass sich die Moduli ( $G'$ ,  $G''$  und  $G^*$ ) mit zunehmendem KE-Anteil in der Mischungen im Vergleich zum WM bei einer Deformation von  $\gamma = 10^{-3}$  leicht erhöhen. Eine deutliche Differenz wurde bei der Mischung mit 30 % KE um 9000 Pa festgestellt. Eine stabile Struktur im Ruhezustand wird aufgrund der Dominanz des WM-Mehls in den Mischungen ermittelt.

### 7.1.1.3. Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3

Eine Besonderheit dieses Versuchsansatzes ist die identische chemisch-analytische Zusammensetzung bei differenzierter Partikulierung. Festgestellte Abweichungen beruhen daher ausschließlich auf der unterschiedlichen Partikulierung der Ingredienzien. In Abb. 7.3 sind die AS-Messungen von Fraktion F1, gemischt mit WM-Mehl, dargestellt.



Aus der Abb. 7.3 ist deutlich zu erkennen, dass für die Fraktionsmischungen ein LVB im Deformationsbereich  $10^{-4} \leq \gamma \leq 10^{-3}$  vorliegt. Im Vergleich der Mischungen untereinander und mit WM-Teig fällt auf, dass sich der  $G'$  mit Erhöhung des Fraktionsanteils in der Mischung gering geändert, was durch die geringere Partikelgröße hervorgerufen wird. Aus der Abb. 7.3 kann folgendes Ranking gegeben werden: KE > 100 % F1 > 30 % F1  $\geq$  20 % F1 > 10 % F1  $\geq$  WM.

Die Werte in Tab. 7.3 verdeutlichen die Beobachtungen aus der Abb. 7.3.

Tab. 7.3: AS-Messung Fraktionen F1 im Vergleich zum WM-Teig

Deformation	Probe	$G'$ $10^4$ Pa	$G''$ $10^4$ Pa	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4$ Pa · s	$ G^* $ $10^4$ Pa
$\gamma = 10^{-3}$	WM	1,90	0,70	0,36	0,32	2,00
	10 % F1	1,90	0,74	0,38	0,33	2,10
	20 % F1	2,40	0,91	0,38	0,41	2,50
	30 % F1	2,60	0,97	0,38	0,44	2,80
	100 % F1	6,60	2,50	0,38	1,12	7,00
	KE	7,20	2,20	0,31	1,20	7,50

Es liegt eine Korrelation zwischen den Partikelgröße und den rheologischen Eigenschaften vor. Die Fraktionsmischung 10 % F1 verläuft deckungsgleich mit dem Messverlauf des WM-Teigs. Ein ähnliches Verhalten zeigt die Fraktion 100 % F1 im Vergleich zum KE-Teig. Dagegen bilden Versuchsanstellungen der Mischungen 20 % und 30 % F1 eine eigene Versuchsklasse ab. In Abb. 7.4 sind die AS-Messungen von KE-Fraktion F2, gemischt mit WM-Mehl, dargestellt.

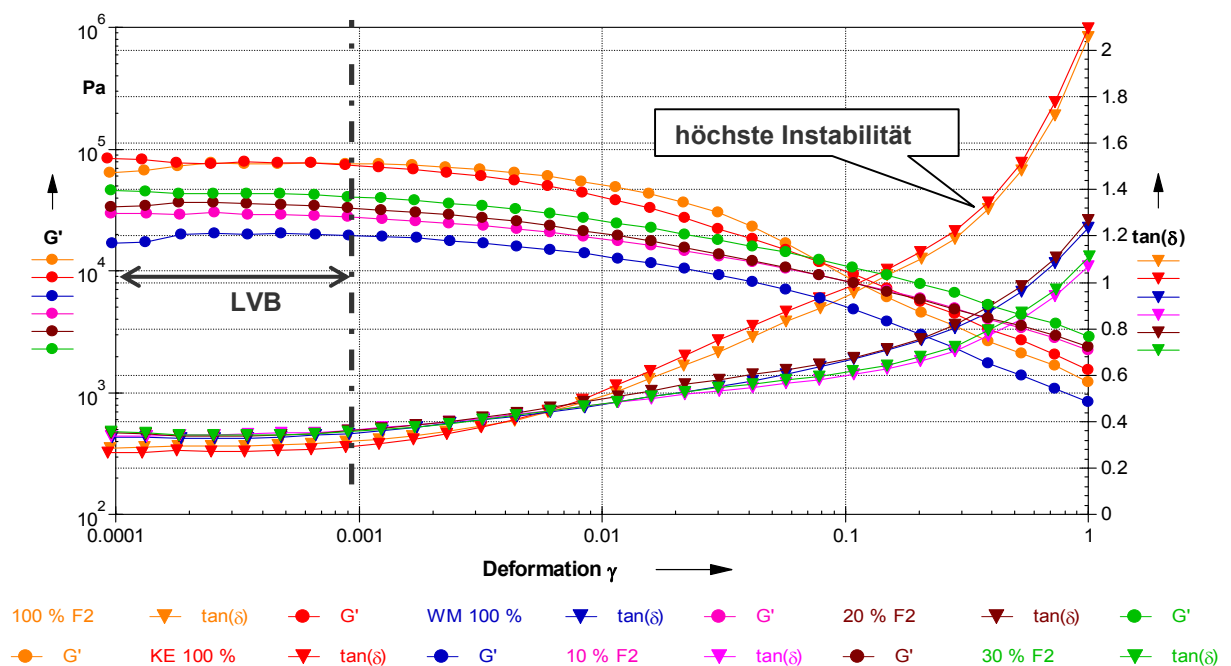


Abb. 7.4: Amplitudensweep der Fraktionsmischungen (10 %, 20 % und 30 % F2)

Auffällig ist bei der Fraktion F2 im Vergleich zum WM-Teig, dass der Level des Speichermoduls für alle drei Mischverhältnisse oberhalb des WM-Teigs liegt und eine eigene Versuchsklasse bildet, was aus der deutlichen Differenz der Speichermoduli folgt. Vergleicht man die Speichermoduli als Maß für die Festkörpereigenschaften, kann folgendes Ranking gegeben werden:

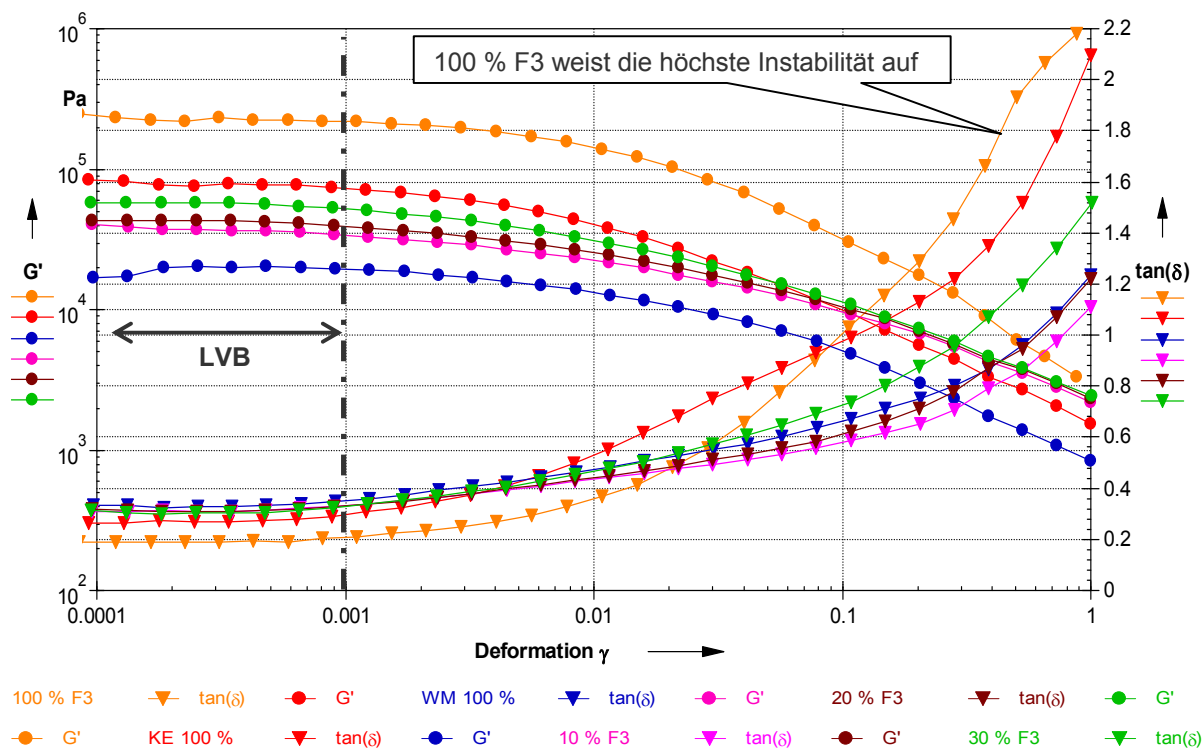
100 % F2 = KE > 30 % F2 > 20 % F2 > 10 % F2 > WM.

Die Darstellung des Ereignisfeldes zur materialwissenschaftlichen Bewertung erfolgt in Tab. 7.4.

Tab. 7.4: AS-Messung Fraktionen F2 im Vergleich zum WM-Teig

Deformation	Probe	$G'$ $10^4$ Pa	$G''$ $10^4$ Pa	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4$ Pa · s	$ G^* $ $10^4$ Pa
$\gamma = 10^{-3}$	WM	1,90	0,70	0,36	0,32	2,00
	10 % F2	2,67	1,00	0,38	0,45	2,85
	20 % F2	3,17	1,17	0,37	0,54	3,38
	30 % F2	3,92	1,43	0,37	0,66	4,17
	100 % F2	7,54	2,45	0,33	1,26	7,92
	KE	7,20	2,20	0,31	1,20	7,50

In Abb. 7.5 sind die AS-Messungen von KE-Fraktion F3, gemischt mit WM-Mehl, dargestellt.



Aus der Abb. 7.5 ist zu erkennen, dass der Level des Speichermoduls von den Mischungen oberhalb des WM-Teigs und unterhalb des KE-Teigs vorliegt und eine eigene Versuchsklasse abgebildet wird.

Auffällig ist, dass die reine Fraktion F3 den höchsten Level aufweist und damit die höchsten Festkörpereigenschaften vorliegt. Bei dieser Versuchsanstellung bedingen die Partikelgrößen der eingegangenen Mahlprodukte die Strukturausbildung. Die Werte in Tab.7.5 bestätigen diese Beobachtungen aus der Abb. 7.5.

Tab. 7.5: AS-Messung Fraktionen F3 im Vergleich zum WM-Teig

Deformation	Probe	$G'$ $10^4$ Pa	$G''$ $10^4$ Pa	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4$ Pa · s	$ G^* $ $10^4$ Pa
$\gamma = 10^{-3}$	WM	1,90	0,70	0,36	0,32	2,00
	10 % F3	3,30	1,12	0,34	0,56	3,50
	20 % F3	3,80	1,30	0,34	0,64	4,00
	30 % F3	5,10	1,70	0,34	0,85	5,40
	100 % F3	22	4,60	0,21	3,50	22,0
	KE	7,20	2,20	0,31	1,20	7,50

Vergleicht man den Speichermodul als Maß für die Festkörpereigenschaften, kann folgendes Ranking gegeben werden: 100 % F3 > KE > 30 % F3 > 20 % F3 > 10 % F3 > WM

Im Gegensatz zu der akzeptablen Strukturstabilität der Fraktion F2, zeigt die Fraktion F3 im Vergleich zum WM-Teig deutliche Strukturänderungen im Verlauf der AS-Messungen an.

So liegt der Speichermodul nahezu um eine Dekade höher, was von der größeren Partikulierung der Fraktion F3 abhängt, gefolgt von einer schnellen Strukturinstabilität. Ein Vergleich des  $\tan \delta$  bei  $\gamma = 1$  weist die bewirkten Instabilitäten nach.

### 7.1.2. Frequenzsweepmessungen

Zur Charakterisierung der Teige als disperse Stoffsysteme wurden das frequenzabhängige Verhalten der Mehle sowie KE-Fraktionen und die Fraktionsabhängigkeit bei den nachfolgenden Mischverhältnissen (10 %, 20 % und 30 % KE) durch Oszillationsmessungen untersucht.

#### 7.1.2.1. Vergleich Weizen- und Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktion)

In Abb. 7.6 findet ein Vergleich der ermittelten Messdaten von KE- und WM-Teig statt. Dargestellt werden der Speicher- und Verlustmodul sowie der Verlustfaktor.



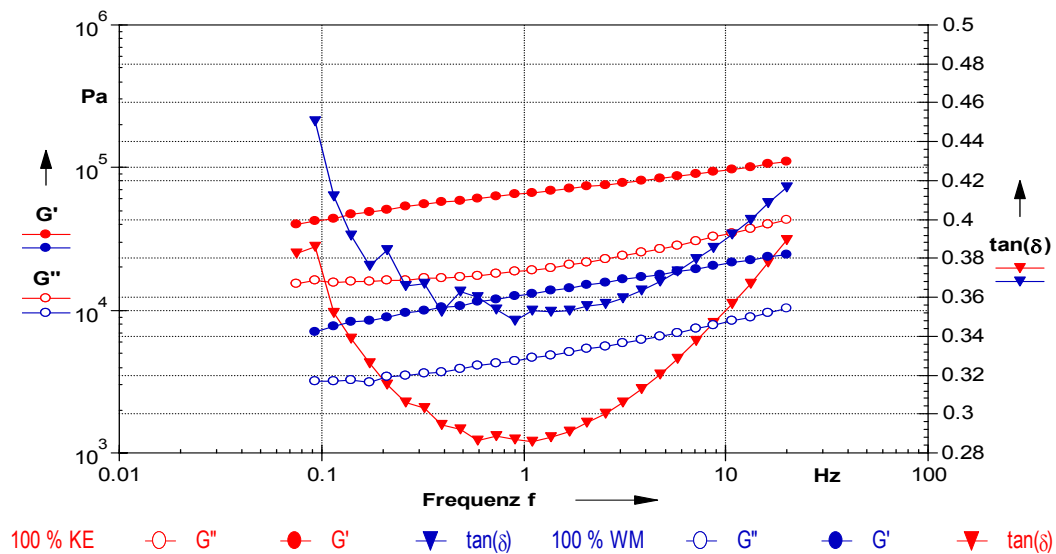


Abb. 7.6: Frequenzweep Vergleich Weizen- und Kichererbsenteig

Aus der Abb. 7.6 ist deutlich zu erkennen, dass beide Teige sowohl WM-Teig als auch KE-Teig einen frequenzabhängigen Anstieg über das Frequenzband aufweisen und nahezu parallel verlaufen. Damit werden eine Dispersionsstruktur und dominante Festkörpereigenschaften der Teigstruktur nachgewiesen. Die Teigstruktur kann den größten Teil der eingebrachten Energie reversibel speichern. Bei den untersuchten Teigen erscheint am Beispiel des Verlaufes des  $\tan \delta$  bei hohen Frequenzen die Festkörpereigenschaften am geringsten ausgeprägt. Ein Strukturstabilitätsmaximum wird bei einer Frequenz von ca. 1 Hz generell ermittelt. Der Anstieg im Frequenzbereich  $f < 1$  Hz ist auf die Betonung des viskosen Verhaltens zurückzuführen. Der Anstieg bei höheren Frequenzen  $f > 1$  Hz wird infolge eintretender Strukturzerstörung bei höherer Belastung bewirkt. KE-Teig zeigt ein erhöhtes Level der dynamischen Moduli im Vergleich zum WM-Teig und stellt sich als Teig mit höheren Festkörpereigenschaften heraus. Dagegen zeigt sich der WM-Teig als viskoserer, weicher und formbarer Teig mit besseren Verarbeitungseigenschaften. Die höhere Festigkeit des KE-Teigs resultiert im Wesentlichen aus vorliegenden nativen Stärkepartikeln mit Punktkontakt, die infolge der größeren Kornbereite des KE-Mehls nachgewiesen werden. Aufgrund der Partikelstruktur im nach außen homogenen KE-Teig können die Schwingungen nicht unmittelbar auf das künstliche Netzwerk einwirken und bestehende Trägheitskräfte der Partikel aufheben. Damit sich das KE-Mehl zu Teigen verarbeiten lässt, muss eine bestimmte Proteinart (Kleberprotein) vorhanden sein, um eine homogene Teigmatrix abzubilden. Der Kleber ist ein Gemisch, das nach dem teilweisen Entfalten des Eiweißes (Glutene) durch Kneten und im Zusammenspiel mit viskositätsbildenden Eiweißen (Gliadine) sowie einigen Fetten und Kohlenhydraten eine dichtes, klebriges und dreidimensionales Netzwerk als Dispersionsmittel aufgebaut, was bei KE-Teig nicht der Fall ist. Aufgrund des höheren Protein- und Pentosangehalts im KE-Teig verbessert sich das Wasserbindungsvermögen. Diese Feststellung stimmt mit den Ergebnissen der

Farinographuntersuchungen überein. Der Verlustfaktor verhält sich alternierend im gesamten Frequenzband. Ein Minimum und damit höchste Strukturstabilität liegt bei  $f = 1$  Hz vor.

Aus dem in Abb. 7.6 dargestellten frequenzabhängigen Speicher- und Verlustmodulkurven wurden die Werte der Tab. 7.6 ermittelt. Dabei wurden die Moduli, komplexe Viskosität und komplexer Schubmodul sowie der Verlustfaktor bei einer Frequenz von 1 Hz aufgelistet.

Tab. 7.6: FS-Messung Vergleich WM- und Kichererbsenteig

Probe	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
	Koeffizient $G'_{1\text{ Hz}}$ $10^4$ Pa	$\chi$	Koeffizient $G''_{1\text{ Hz}}$ $10^4$ Pa	$\gamma$	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4$ Pa·s	$ G^* $ $10^4$ Pa
<b>WM</b>	1,27	<b>0,227</b>	0,44	<b>0,212</b>	0,35	0,20	1,39
<b>KE</b>	6,54	<b>0,167</b>	1,89	<b>0,165</b>	0,29	0,99	6,96

Das Minimum an  $\tan \delta = 0,35$  von WM-Teig wird bei einer Frequenz 1 Hz gefunden. Zu beachten ist der (relativ) hohe Wert des  $\tan \delta$  als Indikator viskoelastischen Verhaltens und Charakteristik eines WM-Teigs. Die Festkörpereigenschaften sind beim KE-Teig stärker ausgeprägt und der Verlauf der Moduli weist kein cross over auf. Das Minimum des  $\tan \delta = 0,29$  wird erneut bei einer Frequenz 1 Hz gefunden. Je größer der Wert für den nach Gleichung 3.12 berechneten Exponenten, desto steiler ist der Anstieg als Indikator für den Strukturaufbau und die frequenzabhängige Strukturstabilität. Im Vergleich zum KE-Teig weist WM-Teig höhere Werte der Exponenten und eine Strukturstabilität des Teigs und gleichzeitig die bessere Verarbeitungsfähigkeit am Beispiel des erhöhten  $\tan \delta$  nach.

#### 7.1.2.2. Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl)

In Abb. 7.7 erfolgt eine Zusammenstellung von  $G'$ ,  $G''$  und  $\tan \delta$  für die Teige aus Mehlmischungen im Vergleich zum WM-Teig.

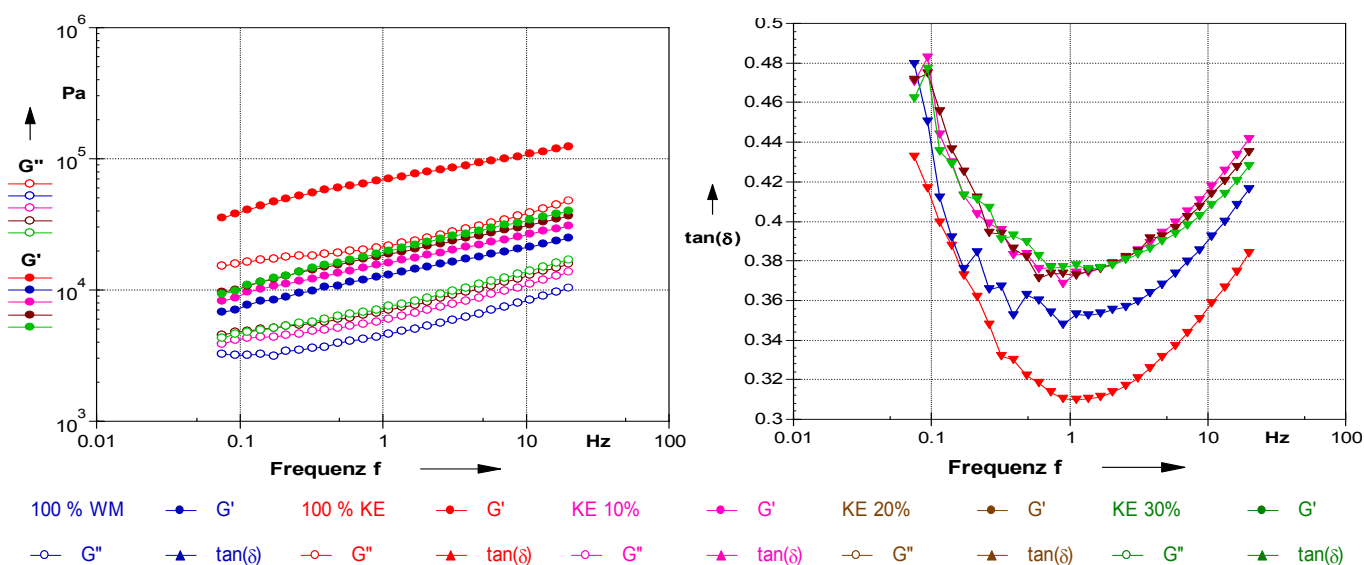


Abb. 7.7: Frequenzsweep der Mehlmischungen (10 %, 20 % und 30 % KE)

Aus der Abb. 7.7 ist zu erkennen, dass es nach der Zugabe des KE-Anteils in Bezug auf WM-Mehl zu einer geschwächten Strukturinteraktionen in der Teigmatrix am Beispiel von  $G'$  kommt. Es ergeben sich die gleichen Aussagen wie im Amplitudensweep. KE-Mischungen liegen oberhalb der viskoelastischen Relation des WM-Teigs. Gleiches gilt für  $G''$ . Die Mehlmischungen zeigen einen ähnlichen frequenzabhängigen Anstieg der Moduli. Mit der Erhöhung der KE-Anteile in den Mischungen zeichnen sich unterschiedliche Modulentwicklungen in logischer Abhängigkeit von der KE-Konzentration ab, die durch erhöhte  $G'$ - und  $G''$ -Level hervorgerufen werden. Festkörperverhalten wird mit zunehmender KE-Konzentration im gesamten Messfrequenzband nachgewiesen. Dieses Materialverhalten resultiert in erster Linie aus Partikelinteraktionen der dispersen Phase aus dem Punktkontakt der größeren Mehlpartikel mit erhöhter **Viskoelastizität**. Eiweißbedingte Interaktionen „sollten“ aufgrund der Wirkung als Dispersionsmittel die viskoelastische Relation steigern.

Eine differenzierte Betrachtung des realen Einflusses der Proteinanreicherung kann daher nur bei Messungen innerhalb der gleichen Kornklasse erfolgen. Diese Änderung der Teigeigenschaften ist auf die Abschwächung der Bildung des Glutennetzwerks zurückzuführen (Schwächungswirkung des inkompatiblen KE-Proteins für die Kleberbildung infolge Überlagerung von Pentosaninteraktionen). Es liegt neben der strukturellen Inkompatibilität zwischen den Proteinen (KE und WM, die sich aus ernährungsphysiologischer Sicht gut ergänzen) eine negative Superposition infolge Polysaccharideinfluss vor. Auch der höhere Anteil des Fettes in KE-Mehl kann das Hydratisierungsprozess von Proteinteilchen während des Knetens verringern und dadurch eine ideale Netzwerkbildung im Teig verhindern.

Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die Zugabe von KE-Mehl bis zu 20 % die Verarbeitungseigenschaften des Teigs nicht beeinträchtigt, da das viskoelastische Verhalten durch dominante WM-Anteile erhalten bleibt. Der Verlauf des Verlustfaktors im Frequenzband zeigt die Unterschiede im viskoelastischen Verhalten der untersuchten Mehlmischungen auf. Im direkten Vergleich kann sowohl bei WM-Teig als auch bei deren Mischungen ein alternierendes Verhalten festgestellt werden. Die Veränderung der Teigmaterialieigenschaften nach der Zugabe von KE-Mehl auf den rheologische Eigenschaften ist in Tab. 7.7 als Formalisierung der Messdaten aus Abb. 7.7 erfolgt.

Tab. 7.7: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mischungen

Probe	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
	Koeffizient $G'_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	x	Koeffizient $G''_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	y	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4\text{ Pa} \cdot \text{s}$	$ G^* $ $10^4\text{ Pa}$
<b>WM</b>	1,27	<b>0,227</b>	0,44	<b>0,212</b>	0,35	0,20	1,39
<b>10 % KE</b>	1,57	<b>0,225</b>	0,58	<b>0,209</b>	0,37	0,25	1,72
<b>20 % KE</b>	1,82	<b>0,232</b>	0,68	<b>0,212</b>	0,37	0,29	1,99
<b>30 % KE</b>	1,92	<b>0,255</b>	0,73	<b>0,234</b>	0,38	0,31	2,13
<b>KE</b>	6,54	<b>0,167</b>	1,89	<b>0,165</b>	0,29	0,99	6,96

Aus der Tab. 7.7 geht deutlich hervor, dass die Exponenten der Mischungen im Vergleich zum WM-Teig

geringste Änderungen aufweisen. Das bedeutet, dass die Teige aus Mischungen einen ähnlichen Strukturbildungsmechanismus bzw. frequenzabhängigen Strukturaufbau aufweisen, was durch den dominanten Einfluss des WM-Anteils im Teigsystem zu erklären ist.

Dagegen weisen die Exponenten  $x$  und  $y$  bei KE-Teig im Vergleich zum WM-Teig einen deutlichen Unterschied auf. Abweichungen liegen bei der 30 % KE-Zumischung vor.

### 7.1.2.3. Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3

Nachfolgend werden die speziellen Interaktionen von KE-Fractionen F1, F2 und F3 mit dem bekannten Mischungsverhältnis untersucht. In Abb. 7.8 erfolgt eine Zusammenstellung der dynamischen Kennwerte für die konzentrationsabhängigen Mischungen F1 im Vergleich zum WM-Teig.

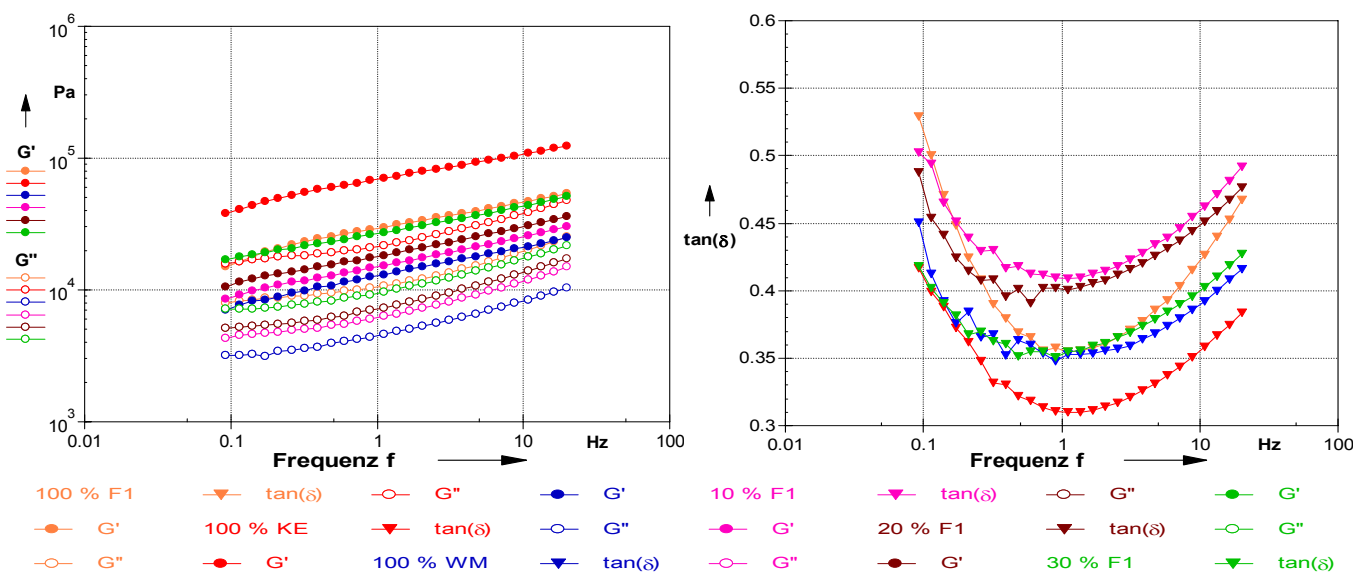


Abb. 7.8: Frequenzsweep der Fraktionsmischungen (10 %, 20 % und 30 % F1)

Im Vergleich zum WM-Teig liegen die Moduli  $G'$ ,  $G''$  mit zunehmender Fraktionskonzentration F1 auf einem höheren Niveau infolge verstärkter Proteininteraktionen vor. In Tab. 7.8 sind charakteristische Größen der Versuchsanstellungen aus Abb. 7.8 aufgeführt.

Tab. 7.8: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Fraktionsmischungen F1

Probe	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
	Koeffizient $G'_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$x$	Koeffizient $G''_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$y$	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4\text{ Pa} \cdot \text{s}$	$ G^* $ $10^4\text{ Pa}$
<b>WM</b>	1,27	<b>0,227</b>	0,44	<b>0,212</b>	0,35	0,20	1,39
<b>10 % F1</b>	1,51	<b>0,222</b>	0,61	<b>0,211</b>	0,41	0,24	1,66
<b>20 % F1</b>	1,82	<b>0,216</b>	0,73	<b>0,214</b>	0,40	0,28	1,97
<b>30 % F1</b>	2,70	<b>0,198</b>	0,96	<b>0,198</b>	0,36	0,42	2,90
<b>100 % F1</b>	2,86	<b>0,223</b>	1,04	<b>0,186</b>	0,36	0,46	3,18
<b>KE</b>	6,54	<b>0,167</b>	1,89	<b>0,165</b>	0,29	0,99	6,96

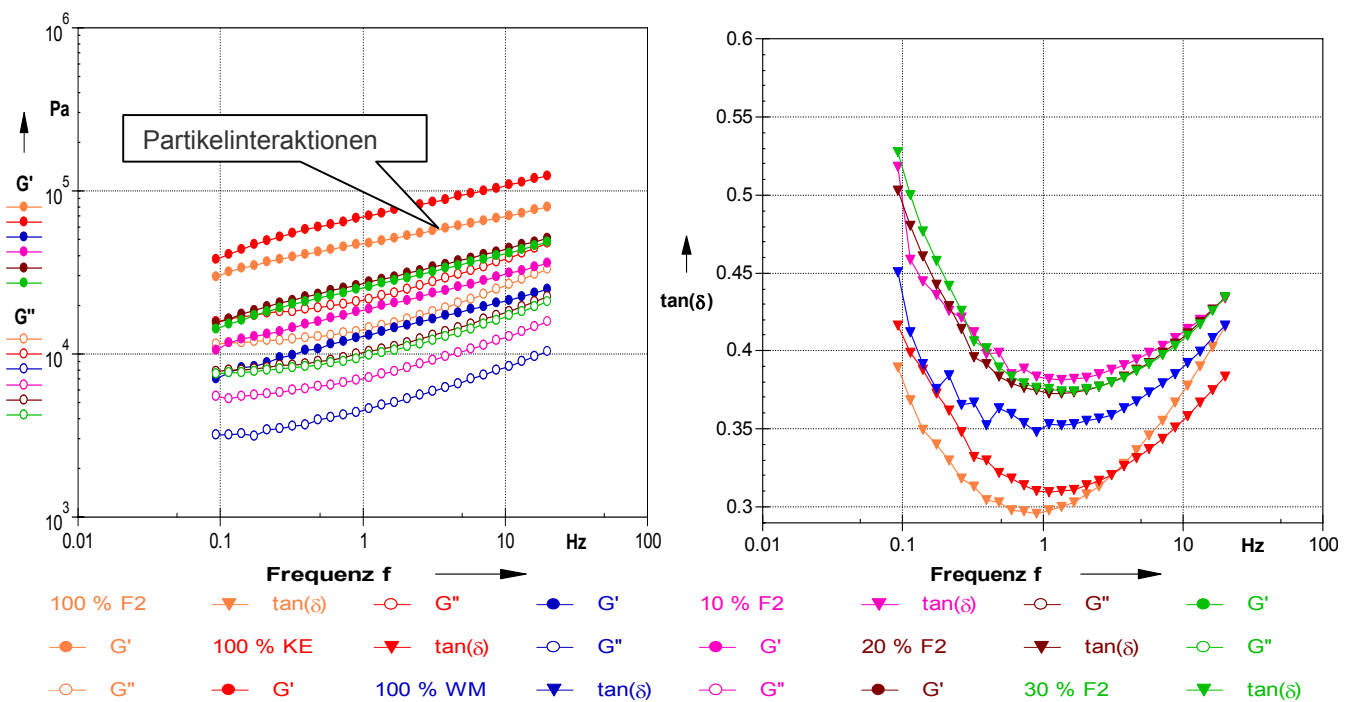
Die Exponenten des Strukturaufbaus verändern sich mit Ausnahme von 30 % F1 gering konzentrationsabhängig. Aus der Tab. 7.8 kann folgende Ranking für  $G'$  gegeben werden:

KE > 100 % F1 > 30 % F1 > 20 % F1 > 10 % F1 > WM.

Die berechneten Exponenten  $x$  und  $y$  sind gut geeignet, die Teigstrukturentwicklung und die Teigstrukturstabilität numerisch nachzuweisen. Im direkten Vergleich mit Weizenmehl sinken diese Kennwerte mit der vorliegenden Partikulierung in Relation zum Weizen- und Kichererbsenmehl. Eine Partikelkompatibilität ergibt gleiche Exponenten, siehe 100 % F1 zu Weizenmehl und 100 % F2 zu Kichererbsenmehl. Maximale Stabilität liegt bei gleicher Partikulierung vor.

Bei den Verlustfaktoren, als schärfsten Indikator für die Strukturentwicklung und damit für die Stabilität, sind kaum eindeutige Tendenzen sichtbar. Alle Mischungen liegen mit ihren Werten für  $\tan \delta$  bei einer Frequenz von 1 Hz in einem Bereich von 0,36 – 0,41.

In Abb. 7.9 erfolgt eine Zusammenstellung von  $G'$ ,  $G''$  und  $\tan \delta$  für die Fraktionsmischungen F2 im Vergleich zum WM-Teig.



Betrachtet man die Diagramme der Fraktionsmischungen F2 im Vergleich zum WM-Teig, so sind erhebliche Änderungen der Moduli zu beobachten. Der Speichermodul von allen drei Mischungen liegt oberhalb des WM-Teigs vor. Die Mischungen zeigen erneut eine deutliche Frequenzabhängigkeit. Die Zugabe der Kichererbsenfraktion F2 verläuft im doppelt-logarithmischen Funktionspapier als Gerade. Es liegt ein typischer Verlauf für eine Dispersionsstruktur vor und es gilt folgende Ranking:

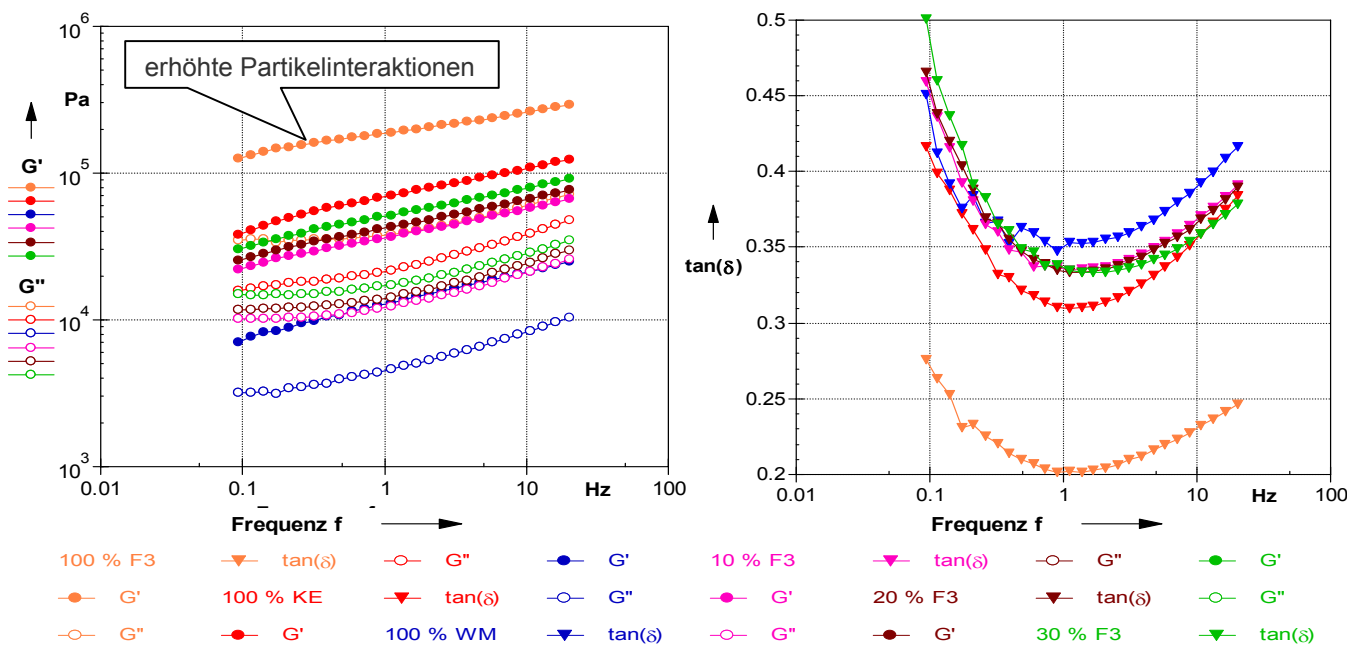
KE > 100 % F2 > 30 % F2 < 20 % F2 > 10 % F1 > WM.

Der Verlauf des  $\tan \delta$  in Frequenzband zeigt die resultierenden Unterschiede im viskoelastischen Verhalten der untersuchten Mehlmischungen auf. Alle Teige zeigen einen alternierenden Verlauf des Verlustfaktors mit Minimum bei  $f = 1$  Hz, wo die Festkörpereigenschaften ein Maximum aufweist. Auffällig ist, dass  $\tan \delta$ -Kurven von Zumischungen oberhalb des WM-Teigs in einem engen Rand verlaufen. Eine Zusammenstellung der materialwissenschaftliche Kennwerte erfolgt in Tab. 7.9

Tab. 7.9: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Fraktionsmischungen F2

Probe	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
	Koeffizient $G'_{1 \text{ Hz}}$ $10^4 \text{ Pa}$	$\chi$	Koeffizient $G''_{1 \text{ Hz}}$ $10^4 \text{ Pa}$	$\gamma$	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$ G^* $ $10^4 \text{ Pa}$
<b>WM</b>	1,27	<b>0,227</b>	0,44	<b>0,212</b>	0,35	0,20	1,39
<b>10 % F2</b>	1,85	<b>0,216</b>	0,71	<b>0,185</b>	0,39	0,29	2,02
<b>20 % F2</b>	2,68	<b>0,215</b>	1,02	<b>0,180</b>	0,38	0,42	2,95
<b>30 % F2</b>	2,51	<b>0,218</b>	0,95	<b>0,172</b>	0,38	0,40	2,77
<b>100 % F2</b>	4,70	<b>0,170</b>	1,39	<b>0,165</b>	0,30	0,72	5,02
<b>KE</b>	6,54	<b>0,167</b>	1,89	<b>0,165</b>	0,29	0,99	6,96

Nachfolgend wird der Einfluss der Inkompatibilität des Partikelspektrums von WM und KE-Fraktion F3 auf das rheologische Verhalten des WM-Teigs untersucht. In Abb. 7.10 erfolgt eine Zusammenstellung der rheodynamischen Kennwerte für die Fraktionsmischungen F3 im Vergleich zum WM-Teig.



Aus der Abb. 7.10 ist deutlich zu erkennen, dass es nach Zugabe von KE-Fraktion F3 zu verstärkten Strukturinteraktionen durch Punktkontakt in der Teigmatrix kommt.

Die Levels beider Moduli weisen einen großen Abstand zum WM-Teig auf, was auf dem Punktkontakt der raueren Partikeloberfläche sowie eine geringere spezifische Oberfläche zurückzuführen ist. Offensichtlich überlagert der Ausmahlungsvorgang die Konzentrationsabhängigkeit des KE-Mehls im Teigmischsystem dominant. Der Verlustfaktor wird logisch konzentrationsabhängig ermittelt. Trotz erhöhtem Speichermodullevel mit zunehmendem Fraktionsanteil in den Mischungen zeigen diese ein mehr **viskoelastisches** Verhalten im Vergleich zum KE-Teig, resultierend aus der Dominanz des WM-Teigverhaltens. Die Werte in Tab. 7.10 formalisieren die Messdaten aus der Abb. 7.10.

Tab. 7.10: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Fraktionsmischungen F3

Probe	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
	Koeffizient $G'_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\alpha$	Koeffizient $G''_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\gamma$	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4\text{ Pa} \cdot \text{s}$	$ G^* $ $10^4\text{ Pa}$
<b>WM</b>	1,27	<b>0,227</b>	0,44	<b>0,212</b>	0,35	0,20	1,39
<b>10 % F3</b>	3,62	<b>0,196</b>	1,22	<b>0,161</b>	0,34	0,56	3,90
<b>20 % F3</b>	4,19	<b>0,197</b>	1,41	<b>0,158</b>	0,34	0,65	4,25
<b>30 % F3</b>	5,03	<b>0,198</b>	1,72	<b>0,142</b>	0,34	0,78	5,45
<b>100 % F3</b>	18,6	<b>0,143</b>	3,88	<b>0,115</b>	0,21	2,77	19,3
<b>KE</b>	6,54	<b>0,167</b>	1,89	<b>0,165</b>	0,29	0,99	6,96

Durch diese umfangreichen Untersuchungen wird nachgewiesen, dass sowohl das Protein- wie auch das Partikelspektrum entscheidend den Strukturaufbau und die Strukturstabilität beeinflussen.

### 7.1.3. Temperatursweepmessungen

Bei konstanter Amplitude von  $10\text{E-}3$ , sowie konstanter Frequenz von  $1\text{ Hz}$  wurde die Temperatur mit Heizraten von  $1\text{ K / min}$  geändert. Diese Heizrate wurde gewählt, um Gradientenfreiheit in der Probe zu sichern und stattfindende Prozesse wie Denaturierung von Proteinen, Vor- und Verkleisterung der Stärke sowie die Mobilisierung des Wassers deutlich detektieren zu können. Durch den Temperatursweep sollten die Backeigenschaften von WM-Teig, KE-Teig und den Präparationen vergleichsweise simuliert werden. Die Auswertung jeder TMS-Messungen erfolgte anhand der Kriterien:

- Messung der  $G'$  und  $G''$ - Kurven und  $\tan \delta$  als Funktion der Temperatur.
- Analyse des  $\tan \delta$  -Kurvenverlaufs als Phasenumwandlungsindikator.
- Ermittlung der Hysteresis des  $\tan \delta$  -Verlaufes bei Erwärmung.

#### 7.1.3.1. Weizen- und Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktion)

In Abb. 7.11 sind am Beispiel des Speicher- und Verlustmoduls sowie des Verlustfaktors die temperaturabhängigen Verläufe von WM-Teig dargestellt.



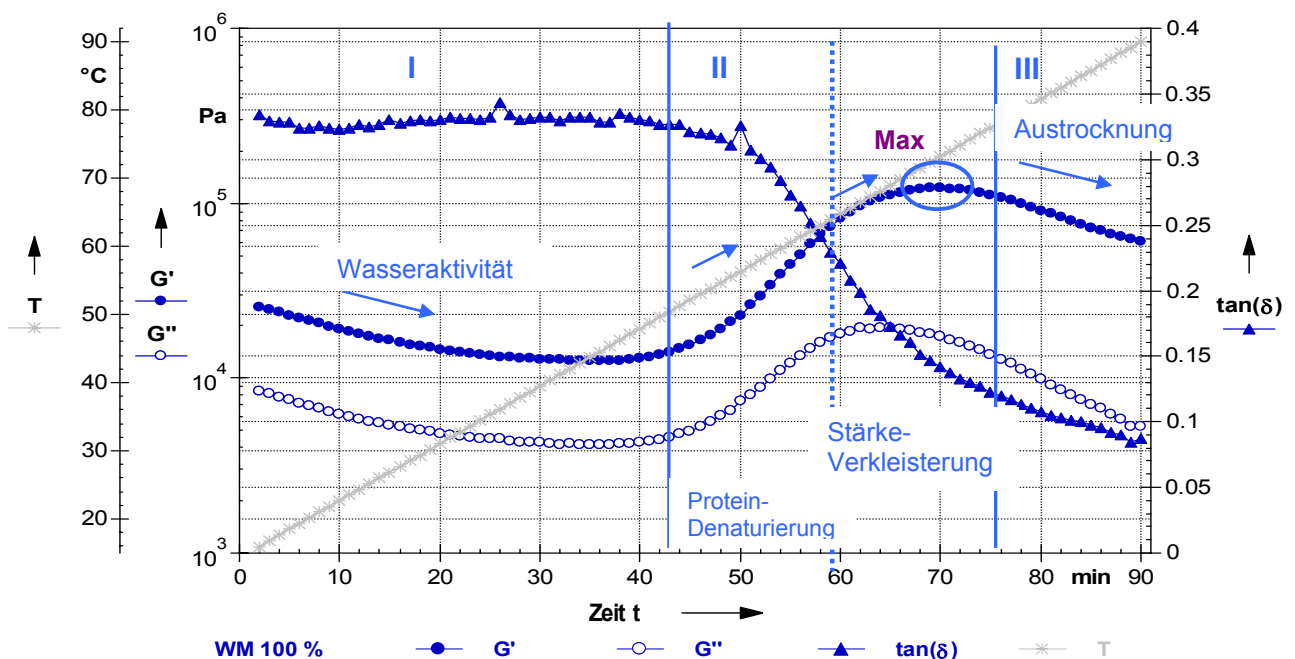


Abb. 7.11: Weizenteig Simulation der Backeigenschaften

Über den gesamten Temperaturbereich dominieren die Festkörpereigenschaften  $G' > G''$ . Es kommt zu keinem Zeitpunkt zu einer thermisch induzierten rheologischen Phaseninversion, da die Kurven der Moduli zu großen Teilen nahezu parallel verlaufen. Der Messverlauf kann temperaturabhängig in 3 Abschnitte eingeteilt werden:

**Abschnitt (I):** durch die Erwärmung werden  $G'$  und  $G''$  bis ca. 45 °C infolge Temperaturerhöhung reduziert und die Wasseraktivität/Wasserimmobilität erhöht sich, was eine Verfestigung des Teigs nachweist (siehe Tab. 7.11). Der  $\tan \delta$  zeigt ein absolutes Maximum mit 0,34 bei einer Temperatur von 45 °C und indiziert die geringste Strukturstabilität im Erwärmungsprozess.

**Abschnitt (II):** Ab einer Temperatur von 46 °C kommt es zu einem allmählichen Abfall des Verlustfaktors mit einhergehendem stetigem Anstieg der beiden dynamischen Moduli, was immer auf eine Änderung der Strukturierung (Verfestigung) hindeutet. Der Abfall des Verlustfaktors während der Erwärmung ist durch zunehmende Stabilisierung aufgrund von Wechselwirkungen in der Stärke- Protein-Matrix zu erklären. In dieser Phase findet eine erleichterte Diffusion des freien Restwassers in die Stärkekristalle statt, was zu einer Immobilisierung führt. Im Bereich von 57...63 °C denaturieren die Kleberproteine und verlieren dabei ihre Verformbarkeit und ursprünglichen biologischen Eigenschaften. Nach den Kleberproteinen denaturiert die Proteinmembrane um die Stärkekörner bei ca. 65 °C und wird dabei wasserdurchlässig.

Das vom Kleberprotein abgegebene Wasser nehmen die Stärkekörner nun vollständig auf und es findet der Verkleisterungsprozess statt. Die Stärke quillt dadurch auf und das Volumen der Stärkekörner nimmt zu, wobei die umhüllende Proteinmembran platzt. Die gequollene Stärke wird nun von der Amylase (Optimum bei 62 °C) angegriffen und in große Bruchstücke (Dextrine) gespalten. Durch den hohen Druck der quellenden Stärkekörner werden alle kristallinen Stärkestrukturen zerstört. Die Stärke ist vollständig



verkleistert und die dynamischen Moduli weisen ein absolutes Maximum bei 72,5 °C auf.

**Abschnitt (III):** Nach dem Maximum der Strukturausbildung der verkleisterten Stärke bei einer Temperatur von 72,5 °C kommt es zu einem Abfall der beiden dynamischen Moduli ( $G'$  und  $G''$ ) sowie des  $\tan \delta$ , was zu einer Verfestigung (Austrocknung) des Teigs sowie Strukturstabilität mit zunehmender Strukturbildung (Xerogelausbildung) führt.

Für den WM-Teig wurden in Tab. 7.11 die für den TMS charakteristischen Werte dargestellt. Die rheodynamischen Kennwerte verdeutlichen noch mal die Beobachtungen aus der Abb. 7.11.

Tab. 7.11: Temperatursweep charakteristische Werte von WM-Teig

Probe	Dynamische Kennwerte		I				II				III	
			15	25	35	45	55	60	65	72,5	80	90
WM	$G'$	$10^4$ Pa	2,59	1,74	1,35	1,26	1,92	3,90	8,14	12,2	9,91	6,06
	$G''$	$10^4$ Pa	0,92	0,57	0,45	0,42	0,61	1,11	1,80	1,73	1,13	0,53
	$\tan \delta$		0,36	0,33	0,33	0,33	0,32	0,28	0,22	0,14	0,11	0,09
	$ \eta^* $	$10^4$ Pa · s	0,44	0,29	0,23	0,21	0,32	0,65	1,33	1,96	1,59	0,97
	$G^*$	$10^4$ Pa	2,75	1,83	1,42	1,33	2,01	4,06	8,34	12,3	9,98	6,08

In Abb. 7.12 sind am Beispiel des Speicher- und Verlustmoduls sowie des Verlustfaktors die temperaturabhängigen Verläufe von KE-Teig dargestellt.

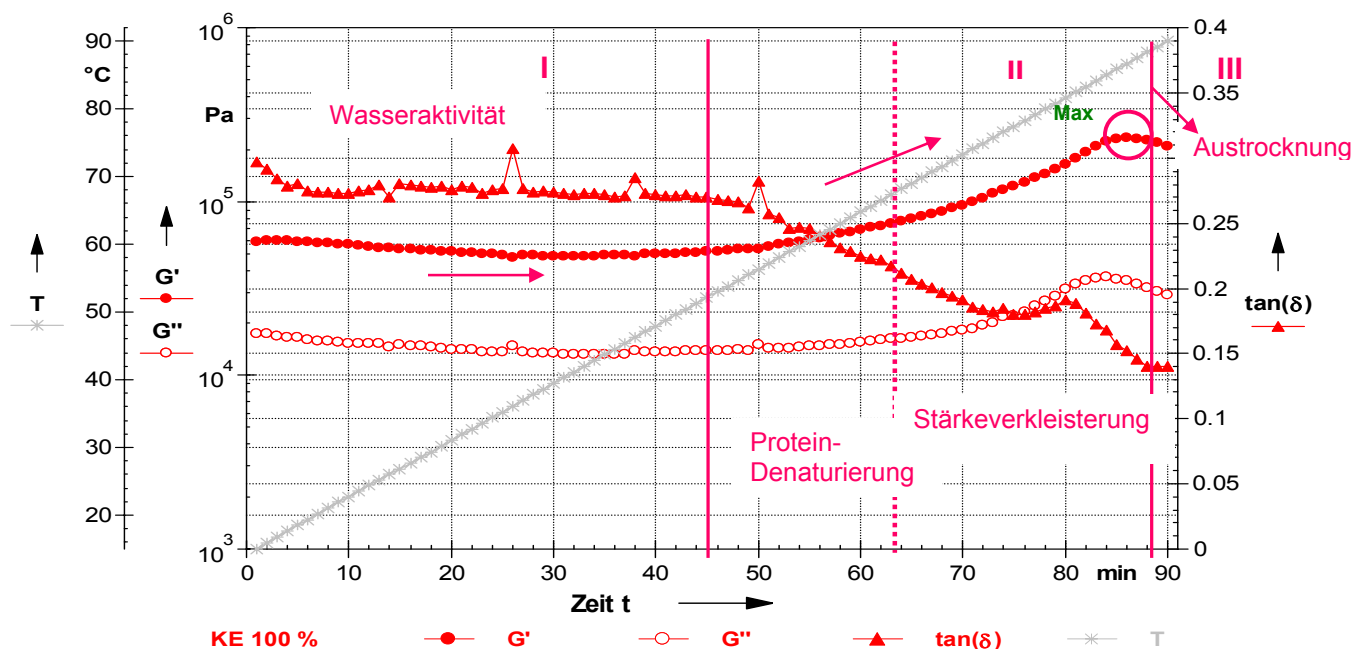


Abb. 7.12: Kichererbsenteig Simulation der Backeigenschaften

Betrachtet man den in Abb. 7.12 dargestellten TMS des KE-Teigs, sind sichtbare temperaturabhängige Strukturänderungen zu erkennen. Es wird eine geringere Änderung des Anstieges des Speicher- und Verlustmoduls sowie Abfall des Verlustfaktors festgestellt.

Der Teig stellt sich vergleichsweise steif (bockig) und inhomogen dar, wie es von einem KE-Teig erwartet wird, was auf die Abwesenheit des Glutens (fehlendes Gliadin) im KE-Mehl zurückzuführen ist. Wie beim WM-Teig kann der Messverlauf in 3 Abschnitte eingeteilt werden:

**Abschnitt (I):** durch die Erwärmung nehmen der Speicher- und Verlustmodul bis ca. 44 °C infolge Temperaturerhöhung leicht ab.

**Abschnitt (II):** ab einer Temperatur von 48 °C weisen die dynamische Moduli  $G'$  und  $G''$  stetige Anstieg bis ca. 86,5 °C auf, wo das Maximum der verkleisterten Stärke hervorgerufen ist. Auffällig ist in diesem Abschnitt, dass der Kurvenverlauf des Verlustfaktors einen Übergangsbereich im Temperaturbereich von 78,2 °C bis 82,6 °C aufweist, was auf eine mögliche Immobilisierung des Wassers durch die Bindung an die verkleisterte Stärke zurückzuführen ist. Als Hypothesen für den Anstieg des elastischen Anteils im System in der Erwärmungsphase kann auf die Proteindenaturierung mit Konfigurationsänderung infolge Auffaltung der Proteine und Unlöslichkeit im Temperaturbereich von 57 - 63 °C zurückgeführt werden. Dadurch wird eine Vergrößerung der aufgefalteten Proteine bewirkt (Vergrößerung, Netzwerkbildung (kein Gluten)) und damit kann eine verstärkte Strukturierung nachgewiesen werden.

In dieser Phase findet ein Diffusionsvorgang des Restwassers statt und wird durch die Proteine und Stärke immobilisiert, wodurch ein Nachquellen der Stärkekörner erfolgt. Mit der beginnenden Denaturierung des Proteins wird Wasser freigesetzt und von der Stärke für die beginnende Verkleisterung aufgenommen. Wasser wird von Stärkekörner aufgenommen und fängt an zu quellen, außerdem liegt die Vermutung nah, dass mit steigenden Temperaturen sich die Wasseraktivität erhöht und danach die Verkleisterungsprozesse der Stärke bei einer Temperatur von 82 °C stattfinden.

**Abschnitt (III):** Nach dem Maximum der Strukturausbildung der verkleisterten Stärke verringern sich die dynamische Moduli und der  $\tan \delta$  fällt weiter ab, was auf eine Austrocknung des Teigs hindeutet. Die Werte, die in der Tab. 7.12 aufgeführt wurden, formalisieren die Daten aus der Abb. 7.12. Die Ergebnisse der MAGV-Untersuchungen werden bestätigt.

Tab. 7.12: Temperatursweep charakteristische Werte von KE-Teig

Probe	Dynamische Kennwerte		I				II				III
	Temperatur °C		15	25	35	45	55	65	75	86,5	90
KE	$G'$	$10^4$ Pa	5,82	5,45	4,95	4,88	5,29	6,89	10,5	23,2	20,7
	$G''$	$10^4$ Pa	0,74	1,52	1,37	1,32	1,41	1,55	1,93	3,52	2,91
	$\tan \delta$		0,30	0,28	0,28	0,27	0,27	0,23	0,18	0,15	0,14
	$ \eta^* $	$10^4$ Pa · s	0,97	0,91	0,82	0,81	0,87	1,13	1,70	3,73	3,33
	$G^*$	$10^4$ Pa	6,12	5,66	5,13	5,06	5,47	7,07	10,7	23,4	20,9

In Abb. 7.13 erfolgt ein Vergleich beider Teige (WM und KE). Der Speicher- und Verlustmodul sowie der Verlustfaktor werden dargestellt.

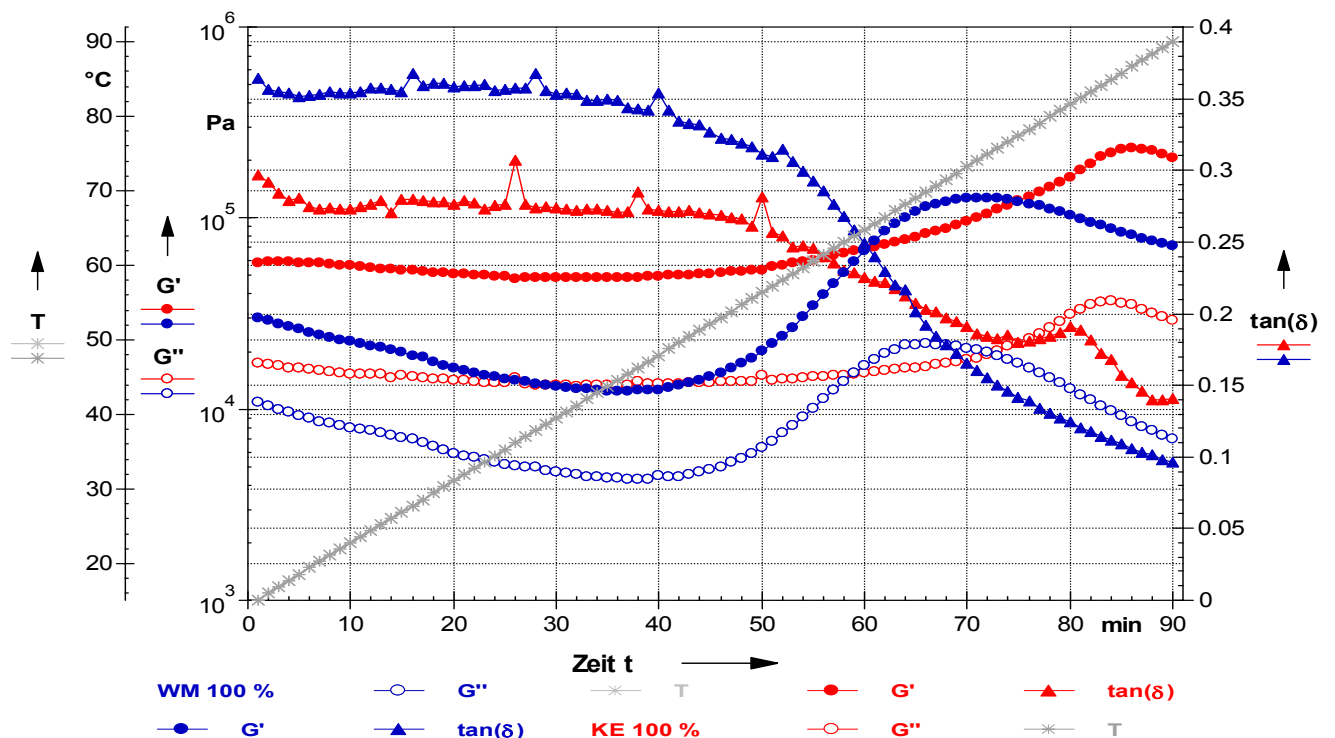


Abb. 7.13: Temperatursweep Vergleich WM-Teig mit KE-Teig

Aus der Abb. 7.13 ist zu erkennen, dass eine erhebliche Abweichung der dynamischen Moduli vorliegt. Für den WM-Teig ergibt sich ein Maximum des  $G'$  bei einer Temperatur von  $72,4^{\circ}\text{C}$ . Beim KE-Teig liegt das Maximum bei  $86,6^{\circ}\text{C}$  vor, was die unterschiedliche Verkleisterungstemperatur der botanisch unterschiedlichen Stärkekörner nachweist.

Im Vergleich zu dem Kurvenverlauf des WM-Teigs ist festzustellen, dass der KE-Teig ein eigenständiges Verhalten aufweist. So sind z. B. auch hier der temperaturabhängige Anstieg des Speicher- und Verlustmoduls und der Abfall des Verlustfaktors vorhanden, auch liegen die Moduli um eine mehrfache Potenz höher und belegen eine geringere Viskoelastizität dieses Teiges.

### 7.1.3.2. Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl)

In Abb. 7.14 erfolgt eine Zusammenstellung der Messergebnisse von Mischungen und WM-Teig

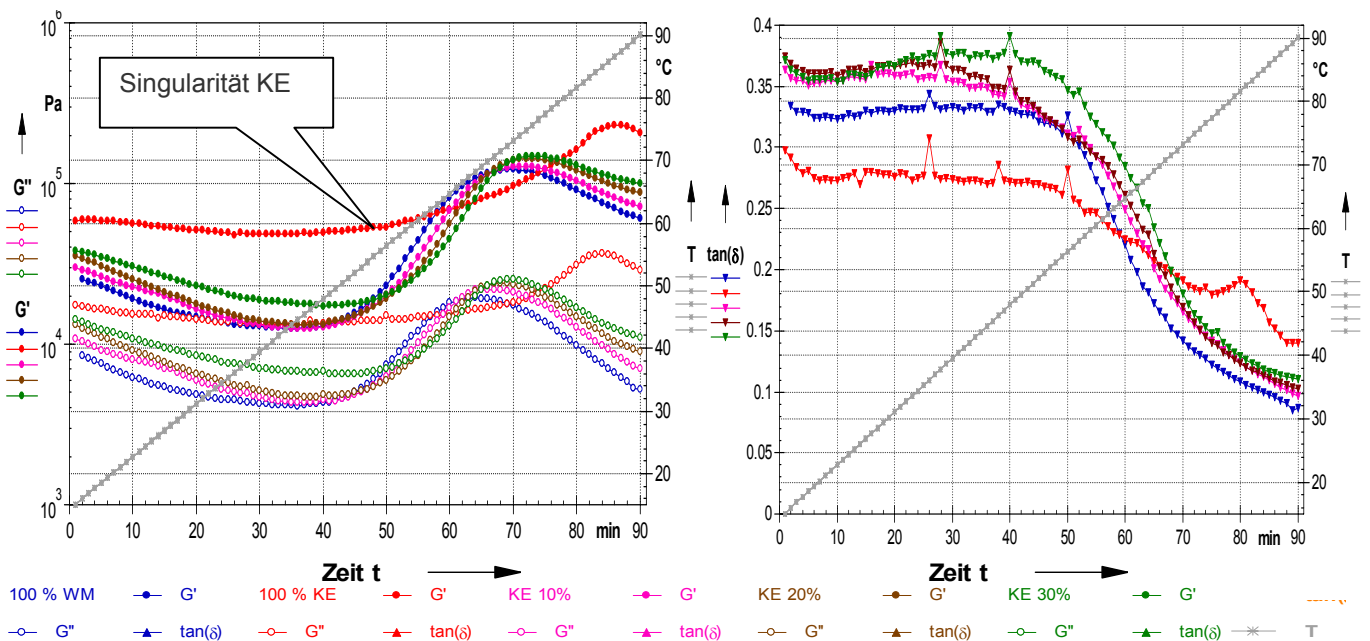


Abb. 7.14: Temperatursweep Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mischungen

Im Vergleich zu dem Verlauf des WM-Teigs ist festzustellen, dass die Mehlmischungen ein tendenziell ähnliches Verhalten zeigen. Erkennbar ist die Singularität des KE-Mehls.

**Abschnitt (I):** Speicher- und Verlustmodul nehmen während des Erwärmungsprozesses bis ca. 45 °C ab. In Temperaturbereich von 15 °C bis 45 °C liegt der dynamische Moduli der Mischungen oberhalb des Levels von WM-Teig vor. Mit zunehmendem KE-Anteil in den Mischungen erhöht sich der  $G'$  und  $G''$  deutlich. Die Kurvenverläufe des Verlustfaktors liegen übereinander und weisen höheren Level im Vergleich zum WM-Teig auf.

**Abschnitt (II):** ab einer Temperatur von 45 °C zeigen die Kurvenverläufe der beiden Moduli einen ausgeprägten Anstieg. Auffällig ist, dass im Temperaturbereich von 54 °C bis 71 °C die Kurvenverläufe der Moduli unterhalb des WM-Teigs vorliegen, was auf eine bessere Strukturstabilität durch Netzwerkbildung (Kleberprotein) beim WM-Teig nachgewiesen wird.

Für WM-Teig und 10 % KE liegt das Maximum des Speichermoduls bei einer Temperatur von 73,2 °C vor. Die Mischung 20 % und 30 % KE weist ein Maximum bei 75,7 °C auf.

**Abschnitt (III):** nach der Vollverkleisterung (Maximum) der Stärkekörner nehmen die Werte der Moduli wieder allmählich ab und die Kurvenverläufe liegen wiederum oberhalb des WM-Teig vor. Da die Kurven zu großen Teilen nahezu parallel verlaufen, ist bei diesen Produkten für die Bewertung des Temperatursweeps der Verlauf des Verlustfaktors ausreichend. Wie zu erkennen ist, sind die Verläufe der Verlustfaktoren, vor allem von Mehlmischungen differenzierter als beim WM-Teig, der die Basislinie darstellt. Vor allem im Temperaturbereichen von 25 ° bis 55 °C sind Schwankungen des Verlustfaktors zu beobachten (siehe Tab. 7.13)

Tab. 7.13: Temperaturesweep Vergleich WM-Teig und Mehlmischungen mit KE-Mehl

Probe	Dynamische Kennwerte Temperatur °C	I				II				III	
		15	25	35	45	55	60	65	72,5	80	90
WM	G' 10 <sup>4</sup> Pa	2,59	1,74	1,35	1,26	1,92	3,90	8,14	12,2	9,91	6,06
	G'' 10 <sup>4</sup> Pa	0,92	0,57	0,45	0,42	0,61	1,11	1,80	1,73	1,13	0,53
	tan δ	0,36	0,33	0,33	0,33	0,32	0,28	0,22	0,14	0,11	0,09
	η*  10 <sup>4</sup> Pa·s	0,44	0,29	0,23	0,21	0,32	0,65	1,33	1,96	1,59	0,97
	G* 10 <sup>4</sup> Pa	2,75	1,83	1,42	1,33	2,01	4,06	8,34	12,3	9,98	6,08
10 % KE	G' 10 <sup>4</sup> Pa	2,89	2,10	1,45	1,25	1,74	3,04	6,75	12,6	11,2	7,21
	G'' 10 <sup>4</sup> Pa	1,09	0,75	0,52	0,44	0,55	0,91	1,68	2,09	1,46	0,69
	tan δ	0,36	0,36	0,6	0,35	0,32	0,30	0,25	0,17	0,13	0,10
	η*  10 <sup>4</sup> Pa·s	0,51	0,37	0,25	0,21	0,29	0,50	1,01	2,04	1,79	0,15
	G* 10 <sup>4</sup> Pa	3,18	2,23	1,54	1,32	1,82	3,17	6,95	12,8	11,3	7,24
20 % KE	G' 10 <sup>4</sup> Pa	3,52	2,27	1,55	1,33	1,71	2,63	5,63	13,9	12,9	8,75
	G'' 10 <sup>4</sup> Pa	1,32	0,83	0,57	0,47	0,55	0,78	1,47	2,35	1,67	0,99
	tan δ	0,37	0,36	0,37	0,36	0,32	0,30	0,26	0,17	0,13	0,10
	η*  10 <sup>4</sup> Pa·s	0,59	0,39	0,25	0,22	0,29	0,44	0,93	2,25	2,07	1,40
	G* 10 <sup>4</sup> Pa	3,75	2,42	1,65	1,41	1,80	2,74	5,82	14,1	13,0	8,80
30 % KE	G' 10 <sup>4</sup> Pa	3,82	2,79	2,04	1,78	1,89	2,50	4,53	14,5	13,8	9,92
	G'' 10 <sup>4</sup> Pa	1,42	1,00	0,76	0,67	0,68	0,81	1,29	2,53	1,87	1,10
	tan δ	0,37	0,36	0,37	0,38	0,36	0,33	0,29	0,18	0,14	0,11
	η*  10 <sup>4</sup> Pa·s	0,65	0,47	0,35	0,30	0,32	0,42	0,75	2,27	2,21	1,59
	G* 10 <sup>4</sup> Pa	4,07	2,96	2,18	1,91	2,02	2,63	4,71	14,3	13,9	9,98

Die über die Temperaturversuche ermittelten charakteristischen Temperaturen für Denaturierung des Proteins- und Stärkeverkleisterungsvorgänge werden vor allem durch die Partikulierung und Inkompatibilität der beiden Proteine (WM und KE) sowie Stärkebeschaffenheit beeinflusst. Prinzipiell ähneln sich die Verläufe der Kurven von Mehlmischungen mit 10 % und 20 % KE-Mehl sehr, wobei sich die Mischungen mit 30 % KE-Mehl aufgrund der höheren Kichererbsenanteile nicht so eindeutig verhalten. Auch hier sind Abweichungen der Speicher- und Verlustmodulwerte im gleichen Temperaturbereich zu beobachten und können auf die gleiche Weise gedeutet werden. Mit zunehmendem Kichererbsenanteil in den Mischungen erhöht sich die Menge des Proteins und der Polysaccharide in der Matrix. Demzufolge erhöht sich die Teigkonsistenz und die intermolekulare Vernetzung nimmt zu. Die physico-chemischen Wechselwirkungen zwischen den Inhaltsstoffen spielen eine Schlüsselrolle bei den rheologischen Eigenschaften der Teige [131, 132, 133, 134]. Im Vergleich zu WM- und KE-Mehl bilden die Mischungen eine eigene Versuchsklasse und belegen die Inkompatibilität bzw. komplexe Form der Strukturausbildung.

### 7.1.3.3. Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3

Nachstehend erfolgt die Aufnahme der dynamischen Moduli und des Verlustfaktors an Teigen aus unterschiedlichen Korngrößenfraktionen von Kichererbsen. Durch den TMS sollte die Auswirkung des

Backprozesses auf strukturelle Veränderungen ermittelt werden. In Abb. 7.15 erfolgt eine Zusammenstellung der Messergebnisse der Mischungen von F1 im Vergleich zum WM-Teig.

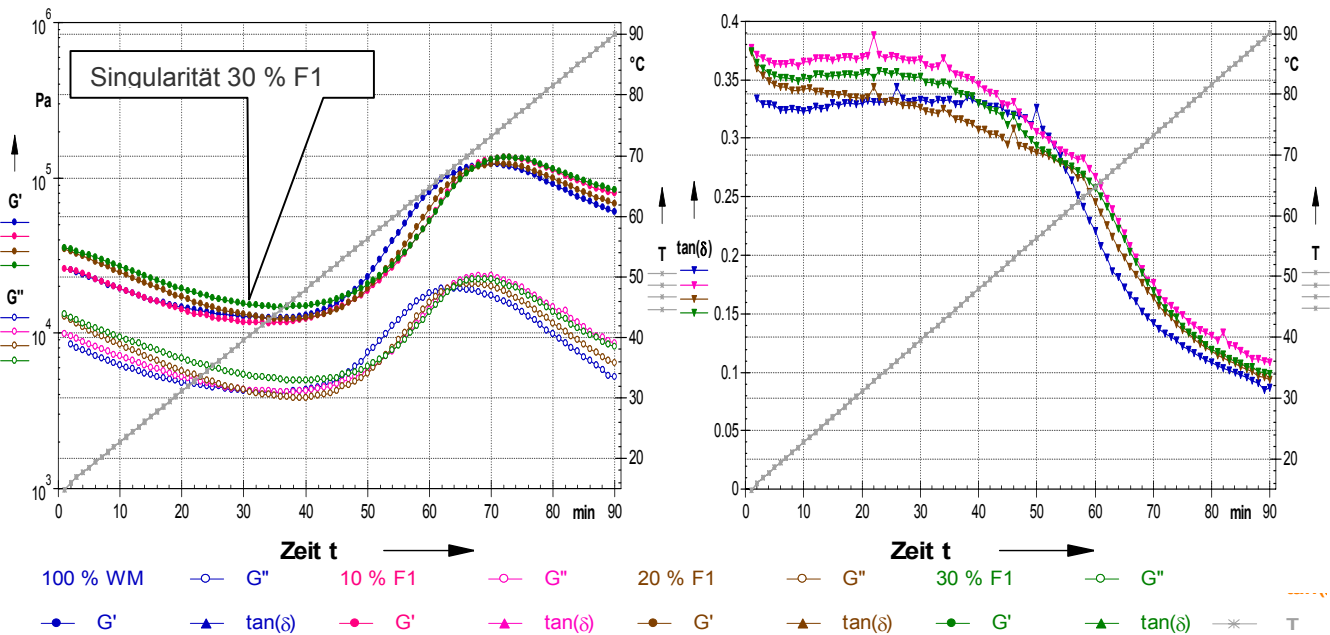


Abb. 7.15: Temperatursweep der F1 im Vergleich zum WM-Teig

Die Werte in Tab. 7.14 formalisieren die Daten aus der Abb. 7.15 und verdeutlichen erneut diese Beobachtungen.

Tab. 7.14: Temperatursweep Fraktionsmischungen F1

Probe	Dynamische Kennwerte		I				II				III	
	Temperatur °C		15	25	35	45	55	60	65	72,5	80	90
10 % F1	G'	10 <sup>4</sup> Pa	2,61	1,75	1,27	1,18	1,65	2,64	5,34	13,2	12,1	7,93
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	0,99	0,65	0,47	0,42	0,52	0,77	1,43	2,32	1,64	0,86
	tan δ		0,38	0,37	0,37	0,36	0,32	0,29	0,27	0,18	0,14	0,11
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,45	0,29	0,22	0,19	0,28	0,44	0,88	2,13	1,94	1,27
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	2,79	1,81	1,35	1,25	1,73	2,75	5,53	13,4	12,2	7,98
20 % F1	G'	10 <sup>4</sup> Pa	3,46	2,19	1,47	1,23	1,67	2,89	6,38	12,3	10,7	6,81
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	1,29	0,75	0,49	0,40	0,49	0,81	1,56	2,01	1,34	0,64
	tan δ		0,37	0,34	0,33	0,32	0,30	0,28	0,25	0,16	0,12	0,09
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,59	0,37	0,25	0,21	0,28	0,48	1,05	1,98	1,72	1,09
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	3,70	2,31	1,54	1,29	1,74	3,00	6,57	12,5	10,8	6,84
30 % F1	G'	10 <sup>4</sup> Pa	3,52	2,41	1,69	1,48	1,85	2,75	5,30	13,1	12,3	8,33
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	1,32	0,86	0,60	0,50	0,56	0,77	1,36	2,22	1,57	0,82
	tan δ		0,37	0,36	0,36	0,34	0,30	0,28	0,26	0,17	0,13	0,09
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,59	0,41	0,29	0,25	0,31	0,46	0,87	2,11	0,97	1,33
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	3,76	2,56	1,80	1,56	1,94	2,86	5,47	13,1	12,4	8,37



Die Fraktionsmischungen verhalten sich nahezu ähnlich wie der WM-Teig. Die Moduli nehmen bis ca. 45 °C ab. Die Fraktionsmischung 10 % F1 verläuft deckungsgleich mit dem Messverlauf des WM-Teigs. Die Mischungen 20 % und 30 % F1 bilden eine eigene Versuchsklasse. In der Übergangsphase ab einer Temperatur von 45 °C steigen die Moduli an und erreichen ein Maximum, was auf die Strukturänderung des Kleberproteins und der Vollverkleisterung der Stärke zurückzuführen ist.

Nach dem Maximum nehmen die beide Moduli ab, was eine Austrocknung des Teigs nachweist. Es kann festgestellt werden, dass der Einfluss des Weizenanteils in den Mischungen auf die Strukturbildung des Teigs überwiegt. In Abb. 7.16 erfolgt eine Zusammenstellung der Messergebnisse der F2 im Vergleich zum WM-Teig.

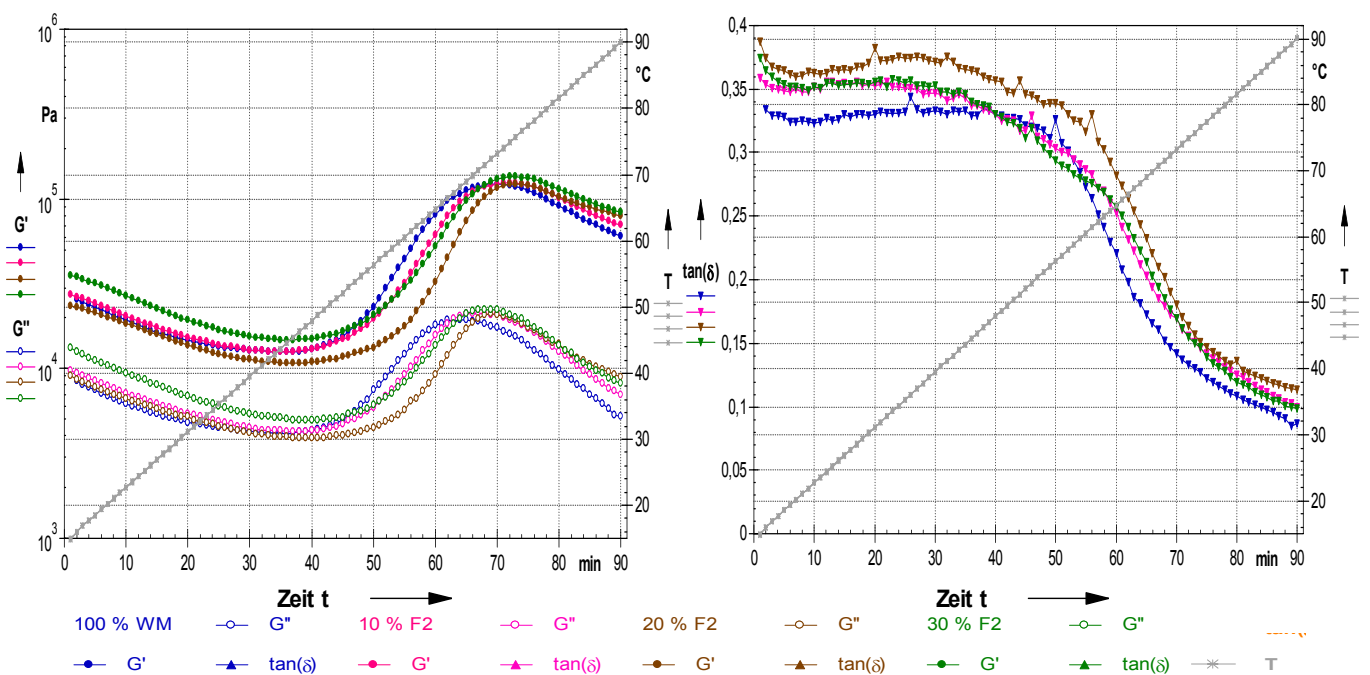


Abb. 7.16: Temperatursweep der F2 im Vergleich zum WM-Teig

Aus der Abb. 7.16 ist zu erkennen, dass die Teigpräparationen aus Fraktion F2 gemischt mit Weizenmehl in drei unterschiedlichen Mischverhältnisse ein ähnliches viskoelastisches Verhalten wie die Fraktionen F1 aufweisen, was durch einen dominanten WM-Anteil in den Mischungen bedingt ist.

Besonders auffällig sind die Mischungen mit 10 % und 20 % F2. Diese zeigen einen deckungsgleichen Messkurvenverlauf im Temperaturbereich (15 °C bis 45 °C) im Vergleich zum WM-Teig.

In der Tab. 7.15 sind charakteristische Kennwerte der KE-Fraktionsmischungen F2 im Vergleich zum WM-Teig aufgeführt.

Tab. 7.15: Temperatursweep Fraktionsmischungen F2

Probe	Dynamische Kennwerte		I				II				III	
			15	25	35	45	55	60	65	72,5	80	90
10 % F2	G'	10 <sup>4</sup> Pa	2,27	1,85	1,38	1,26	1,71	2,86	6,18	12,3	11,5	7,00
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	0,98	0,66	0,48	0,43	0,53	0,83	1,56	2,09	1,45	0,69
	tan δ		0,36	0,36	0,35	0,34	0,31	0,29	0,25	0,17	0,13	0,10
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,46	0,31	0,23	0,21	0,29	0,47	1,02	1,99	1,77	1,12
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	2,89	1,96	1,46	1,33	1,79	2,97	6,38	12,5	11,1	7,04
20 % F2	G'	10 <sup>4</sup> Pa	2,32	1,68	1,22	1,08	1,26	1,65	3,27	11,6	11,1	7,93
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	0,90	0,62	0,46	0,39	0,43	0,54	0,92	2,09	1,51	0,89
	tan δ		0,39	0,37	0,37	0,37	0,34	0,32	0,28	0,18	0,14	0,11
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,39	0,29	0,21	0,18	0,21	0,28	0,54	1,87	1,78	1,27
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	2,49	1,79	1,30	1,15	1,33	1,74	3,40	11,8	11,2	7,98
30 % F2	G'	10 <sup>4</sup> Pa	3,52	2,41	1,69	1,48	1,85	2,75	5,30	13,1	12,3	8,33
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	1,32	0,86	0,60	0,50	0,56	0,77	1,33	2,22	1,57	0,82
	tan δ		0,37	0,36	0,36	0,34	0,30	0,28	0,26	0,17	0,13	0,09
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,59	0,41	0,29	0,25	0,31	0,46	0,87	2,11	1,97	1,33
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	3,76	2,56	1,80	1,56	1,94	2,86	5,47	13,3	12,4	8,37

In Abb. 7.17 sind die TMS-Messungen für den Vergleich WM- und Mischungen F3 ermittelt.

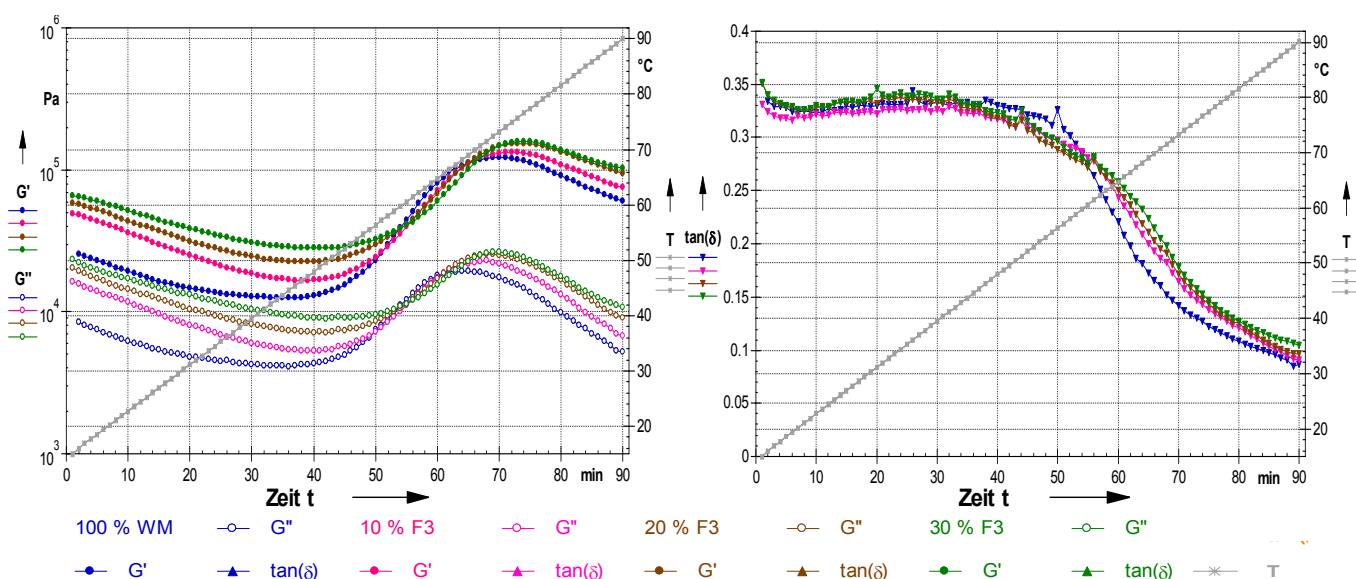


Abb. 7.17: Temperatursweep der F3 im Vergleich zum WM-Teig

Trotz ähnliches Verhalten des Teigs aus den Mischungen aufgrund der Dominanz des WM-Anteils verlaufen die Messkurven von der dynamischen Moduli in einem höheren Niveau im Vergleich zum WM-Teig und weisen deutliche ausgeprägte Festkörpereigenschaften auf. Untereinander zeigen die untersuchten Faktionsmischungen ebenfalls Abweichungen. So liegen die Kurven von Mischungen mit 30 % auf dem höchsten Niveau und weisen dreifach höheren G'-Level als WM-Teig.



Generell ist festzustellen, dass sich mit steigendem Fraktionsanteil in den Mischungen die Speichermodulswerte verdoppeln. Im Temperaturbereich von 15 °C bis 45 °C prägen die Messkurven des  $\tan \delta$  von den Mischungen einen deckungsgleichen Verlauf mit dem WM-Teig aus. Trotz der geringeren Differenzen sind die Teige aus der Mischung am steifsten. Die Darstellung des Ereignisfeldes zur materialwissenschaftlichen Bewertung erfolgt in Tab. 7.16.

Tab. 7.16: Temperatursweep Fraktionsmischungen F3

Probe	Dynamische Kennwerte		I				II				III	
	Temperatur °C		15	25	35	45	55	60	65	72,5	80	90
10 % F3	G'	10 <sup>4</sup> Pa	4,92	3,22	2,12	1,68	2,14	3,54	7,20	13,2	11,8	7,49
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	1,63	1,04	0,69	0,54	0,64	1,01	1,25	2,17	1,50	0,68
	$\tan \delta$		0,33	0,32	0,33	0,32	0,30	0,29	0,24	0,17	0,13	0,09
	$ \eta^* $	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,83	0,54	0,35	0,28	0,36	0,59	1,18	2,12	1,90	1,30
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	5,18	3,39	2,23	1,77	2,23	3,68	7,41	13,3	11,9	7,52
20 % F3	G'	10 <sup>4</sup> Pa	5,84	3,98	2,73	2,26	2,69	3,86	6,85	14,7	14,4	9,46
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	2,05	1,32	0,92	0,74	0,79	1,07	1,71	2,52	1,86	0,91
	$\tan \delta$		0,35	0,33	0,34	0,33	0,29	0,28	0,25	0,17	0,13	0,10
	$ \eta^* $	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,98	0,67	0,46	0,38	0,45	0,64	1,12	2,37	2,30	1,51
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	6,18	4,19	2,88	2,38	2,80	4,00	7,06	14,9	14,5	9,51
30 % F3	G'	10 <sup>4</sup> Pa	6,59	4,70	3,41	2,86	3,02	3,87	6,02	14,7	14,6	10,3
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	2,32	0,56	1,15	0,95	0,92	1,09	1,56	2,62	1,98	1,07
	$\tan \delta$		0,35	0,33	0,34	0,33	0,30	0,28	0,26	0,18	0,13	0,11
	$ \eta^* $	10 <sup>4</sup> Pa · s	1,11	0,79	0,57	0,48	0,51	0,64	0,99	2,37	2,38	1,64
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	6,99	4,95	3,60	3,01	3,20	4,02	6,22	14,9	14,7	10,3

In Abb. 7.18 erfolgen eine wichtige Zusammenstellung der Kennwerte von WM-Teig, KE-Teig und die KE-Fractionen (F1, F2 und F3).

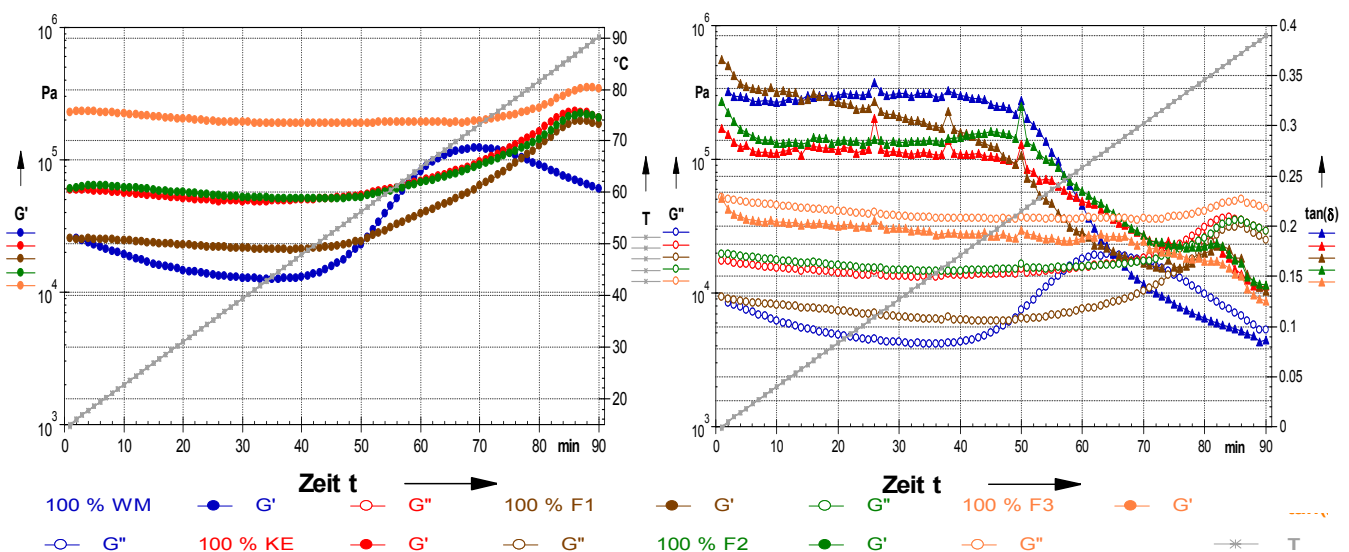


Abb. 7.18: Vergleich WM-Teig mit KE-Teig sowie mit reinen KE-Fractionen

Aus der Abb. 7.18 geht die Singularität des Weizenmehles deutlich hervor. Nahezu parallele/kongruente Verläufe des  $G'$  auf unterschiedlichem Leveln werden nachgewiesen. Das Ranking lautet:

100 % F3 > 100 % F2 = KE > 100 % F1. Aufgrund der nahezu gleichen Partikulierung von KE- und F2-Mehl verlaufen die  $G'$ -Kurven fast deckungsgleich. Aus materialwissenschaftlicher Sicht ist zu beobachten, dass die Fraktion F1 als dem Weizen am ähnlichsten einzuschätzen ist. Die Werte in Tab. 7.17 formalisieren die Daten aus der Abb. 7.18

Tab. 7.17: Temperatursweep Vergleich WM- und KE-Teig sowie reine KE-Fraktionen (F1, F2 und F3)

Probe	Dynamische Kennwerte											
	Temperatur °C	15	25	35	45	55	60	65	72,5	80	86,6	90
WM	$G'$ $10^4$ Pa	2,59	1,74	1,35	1,26	1,92	3,90	8,14	12,2	9,91	7,01	6,06
	$G''$ $10^4$ Pa	0,92	0,57	0,45	0,42	0,61	1,11	1,80	1,73	1,13	0,67	0,53
	$\tan \delta$	0,36	0,33	0,33	0,33	0,32	0,28	0,22	0,14	0,11	0,10	0,09
	$ \eta^* $ $10^4$ Pa · s	0,44	0,29	0,23	0,21	0,32	0,65	1,33	1,96	1,59	1,12	0,97
	$G^*$ $10^4$ Pa	2,75	1,83	1,42	1,33	2,01	4,06	8,34	12,3	9,98	7,04	6,08
100 % F1	$G'$ $10^4$ Pa	2,54	2,40	2,20	2,12	2,33	2,92	3,91	6,32	10,9	19,4	18,4
	$G''$ $10^4$ Pa	0,93	0,80	0,69	0,63	0,62	0,66	0,76	1,03	1,79	3,26	2,49
	$\tan \delta$	0,37	0,33	0,32	0,30	0,27	0,23	0,19	0,16	0,16	0,17	0,14
	$ \eta^* $ $10^4$ Pa · s	0,43	0,40	0,37	0,35	0,38	0,48	0,63	1,02	1,76	3,14	2,96
	$G^*$ $10^4$ Pa	2,70	2,53	2,30	2,21	2,41	3,00	3,99	6,41	11,1	19,7	18,6
100 % F2	$G'$ $10^4$ Pa	6,04	6,05	5,41	5,11	5,16	5,72	6,71	9,05	12,8	22,5	20,7
	$G''$ $10^4$ Pa	1,96	0,71	1,54	1,46	1,51	1,52	1,58	1,73	2,30	3,31	2,91
	$\tan \delta$	0,32	0,28	0,29	0,29	0,29	0,27	0,24	0,19	0,18	0,15	0,14
	$ \eta^* $ $10^4$ Pa · s	1,01	1,00	0,89	0,85	0,86	0,94	1,10	1,47	2,07	3,57	3,32
	$G^*$ $10^4$ Pa	6,05	6,28	5,62	5,31	5,31	5,92	6,89	9,22	13,0	22,4	20,9
100 % F3	$G'$ $10^4$ Pa	22,9	21,6	19,6	18,9	19,0	19,2	19,2	19,6	23,3	34,8	34,4
	$G''$ $10^4$ Pa	5,23	4,40	3,92	3,62	3,59	3,59	3,62	3,63	3,89	4,59	4,32
	$\tan \delta$	0,23	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,17	0,13	0,13
	$ \eta^* $ $10^4$ Pa · s	3,74	3,51	3,19	3,06	3,07	3,10	3,11	3,18	3,45	5,59	5,52
	$G^*$ $10^4$ Pa	23,5	22,0	20,0	19,2	19,3	19,5	19,6	20,0	23,6	35,1	34,7
KE	$G'$ $10^4$ Pa	5,87	5,45	4,95	4,88	5,29	5,89	6,89	9,55	14,5	23,2	20,7
	$G''$ $10^4$ Pa	1,74	1,52	1,37	1,32	1,41	1,46	1,55	1,83	2,66	3,52	2,91
	$\tan \delta$	0,30	0,28	0,28	0,27	0,27	0,25	0,23	0,19	0,18	0,15	0,14
	$ \eta^* $ $10^4$ Pa · s	0,97	0,90	0,82	0,81	0,87	0,97	1,13	1,55	2,34	3,73	3,33
	$G^*$ $10^4$ Pa	6,12	5,66	5,13	5,06	5,47	6,07	7,07	9,73	14,7	23,4	20,9

Im Vergleich mit den Ergebnissen der konventionellen rheologischen Ergebnisse wird durch die moderne Oszillationsmessung eine größere Wissenstiefe zum Einfluss der Ingredienzen auf die Struktur erreicht.

## 7.2. Kriechversuch

Der Kriechversuch eignet sich für den Vergleich der materialwissenschaftlichen Eigenschaften der unterschiedlichen Mehle sowie deren Mischungen bei konstanten Messbedingungen. Dieser Messansatz wird im Rahmen der klassischen Teiguntersuchung nur partiell ausgewertet.

### 7.2.1. Vergleich Weizen- und Kichererbsenmehlteig (Gesamtfraktion)

Äußerst aussagefähig ist der Verlauf der Messkurven der durchgeführten Kriechversuche. In Abb. 7.19 erfolgt zur allgemeinen Charakterisierung wieder die Darstellung von Weizen- und KE-Teig als Messkurven.

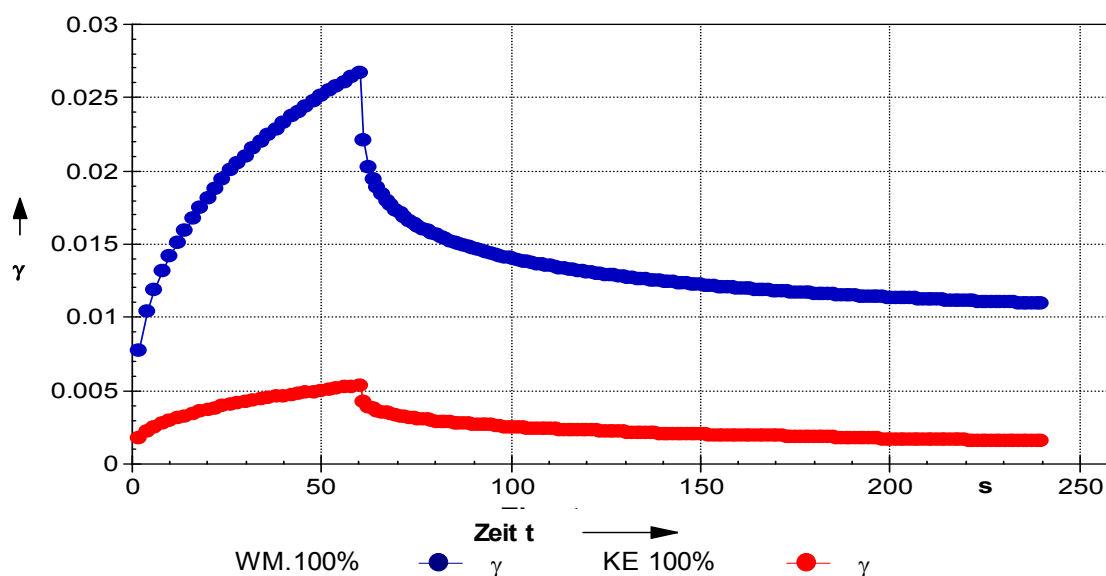


Abb. 7.19: Kriechversuch Vergleich WM- und KE-Teig

Es werden höhere viskoelastische Eigenschaften des WM-Teigs nachgewiesen. Eindeutig ist am Beispiel dieser (alten) konventionellen Methode der gravierende Unterschied in den Struktureigenschaften zwischen WM- und KE-Teig erkennbar.

Im Vergleich zum KE-Teig stellt sich der WM-Teig als optimales viskoelastisches Material dar. Die ausgewerteten Ergebnisse in Tab. 7.18 belegen die Messdaten aus der Abb. 7.19.

Tab. 7.18: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig

Probe	Rheologische Kennwerte								
	$J_e$ $10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$	$\dot{\gamma}_3$ $10^{-4}$	$\gamma_e$ $10^{-2}$	$\gamma_v$ $10^{-2}$	$\gamma_{\max}$ $10^{-2}$	$\gamma_e / \gamma_{\max}$ %	$\eta_0$ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$G_0$ $\text{Pa}$	$\lambda$ $\text{s}$
WM	31,3	1,99	1,57	1,09	2,67	59	251.500	3197	78,7
KE	7,74	0,39	0,38	0,15	0,53	72	1.290.100	12916	99,9

Aus der Tab. 7.18 ist zu erkennen, dass der WM- im Vergleich zum KE-Teig die höheren Werte der maximalen Deformation und Gleichgewichtskriechkomplanz sowie der Rückstellungskraft aufweist. Die

Nullscherviskosität und der Schubmodul zeigen Minima, was auf bessere Fließeigenschaften des Teigs hindeutet. Je größer die Nullscherviskosität und der Schubmodul sind, desto geringer ist die Fluidität des Teiges (Tendenz zur Steifigkeit). Aus der Abb.7.19 sowie der Tab. 7.18 geht hervor, dass die elastischen Deformationsanteile beim WM-Teig nahezu doppelt so groß im Vergleich zu den viskosen Anteilen sind.

### 7.2.2. Mehlmischungen (10, 20 und 30 % Kichererbsenmehl)

Die Kriechversuchsmessungen als klassische rheologische Messanstellungen zur Bewertung der Relation der viskosen und elastischen Anteile des Teiges als Einpunktmessung sind in der Abb. 7.20 enthalten.

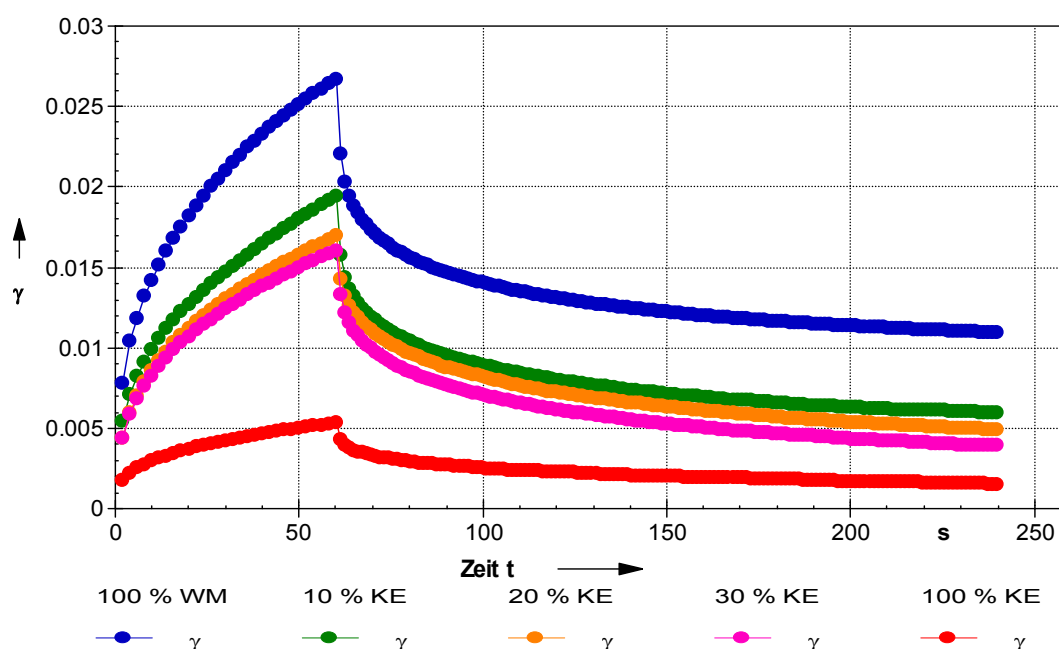


Abb. 7.20: Kriechversuch der Mehlmischungen im Vergleich zum WM- und KE-Teig

Mit zunehmender KE-Konzentration im Teigsystem (Mehlmischungen) verringert sich die maximale Deformation sowie die elastische Rückstellung (von 1,6 auf 0,15). Die Ruhescherviskosität und der Schubmodul erfahren eine Zunahme aufgrund der zunehmenden Festkörpereigenschaften, wodurch schlechtere Verarbeitungseigenschaften nachgewiesen werden.

Tab. 7.19: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mehlmischungen mit KE-Mehl

Probe	Rheologische Kennwerte								
	$J_e$ $10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$	$\dot{\gamma}_3$ $10^{-4}$	$\gamma_e$ $10^{-2}$	$\gamma_v$ $10^{-2}$	$\gamma_{\max}$ $10^{-2}$	$\gamma_e / \gamma_{\max}$ %	$\eta_0$ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$G_0$ $\text{Pa}$	$\lambda$ $\text{s}$
WM	31,3	1,99	1,57	1,09	2,67	59	251.500	3197	78,7
10 % KE	26,9	1,62	1,35	0,59	1,94	69	308.980	3706	83,4
20 % KE	24,4	1,33	1,21	0,49	1,69	71	376.900	4071	92,6
30 % KE	24,5	1,25	1,21	0,39	1,60	76	401.340	4106	97,7
KE	7,74	0,39	0,38	0,15	0,53	72	1.290.100	12916	99,9

Obwohl eine Verschlechterung der Strukturentwicklung im Teigsystem nach der Zugabe des KE-Anteils zum WM-Mehl nachgewiesen wurde, weisen die Mischungen durch die Dominanz des Weizenanteils zulässige Teigverarbeitungseigenschaften auf.

### 7.2.3. Kichererbsenfraktionen F1, F2 und F3

In Abb.7.21 ist ein Vergleich der Kurvenverläufe für Fraktionsmischungen F1 im Vergleich zum WM- und KE-Teig dargestellt.

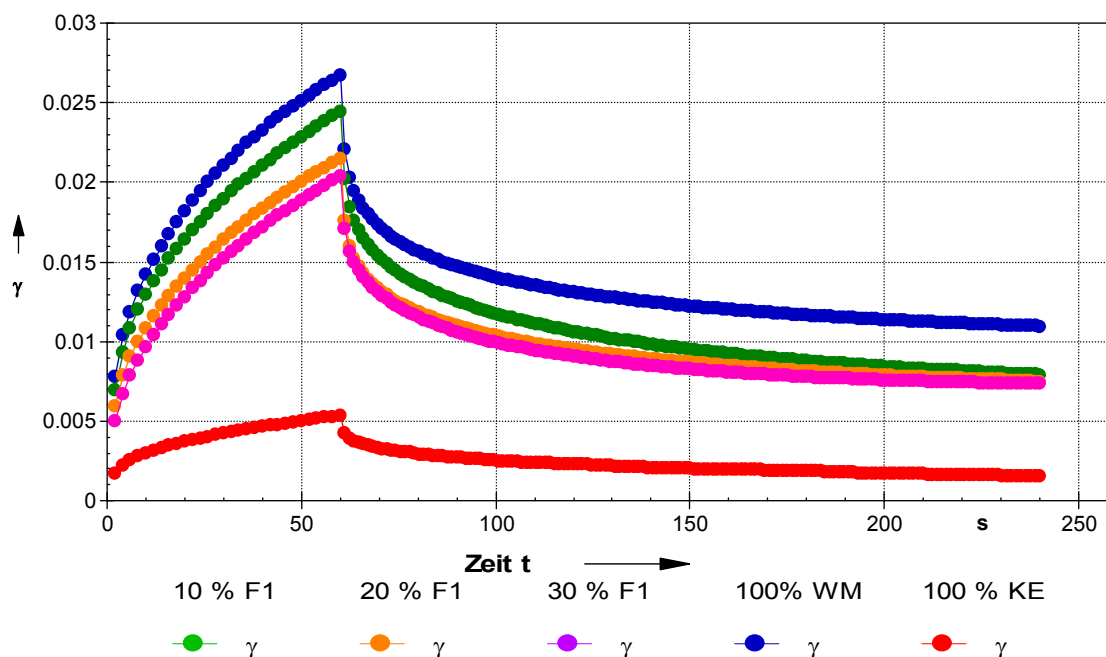


Abb. 7.21: Kriechversuch der Fraktionsmischungen F1 im Vergleich zum WM-Teig

Die in Abb. 7.21 dargestellten Kriechkurven zeigen im Vergleich zum WM-Teig ein ähnliches viskoelastisches Verhalten. So verlaufen die Kriechkurven in der Entlastungsphase nach Wegnahme der Spannung ähnlich und deutet auf eine viskoelastische Relation hin, was auf eine bessere Interaktion auf Partikelebene (Proteininteraktionen) der Fraktion F1 zurückzuführen ist.

Tab. 7.20: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mehlmischungen mit F1

Probe	Rheologische Kennwerte								
	$J_e$ $10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$	$\dot{\gamma}_3$ $10^{-4}$	$\gamma_e$ $10^{-2}$	$\gamma_v$ $10^{-2}$	$\gamma_{\max}$ $10^{-2}$	$\gamma_e / \gamma_{\max}$ %	$\eta_0$ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$G_0$ $\text{Pa}$	$\lambda$ $\text{s}$
WM	31,3	1,99	1,57	1,09	2,67	59	251500	3197	78,7
10 % F1	33,1	1,95	1,65	0,79	2,44	68	256320	3020	84,9
20 % F1	27,9	1,79	1,39	0,75	2,14	65	278970	3592	77,7
30 % F1	26,0	1,77	1,30	0,73	2,03	64	281120	3851	72,9
KE	7,74	0,39	0,38	0,15	0,53	72	1290100	12916	99,9

Die charakteristische Kennwerte des Kriechversuchs, die in der Tab. 7.20 aufgeführt wurden, bestätigen erneut die Schlussfolgerung unter Punkt 7.2.3, dass die Fraktion F1 aus materialwissenschaftlicher Sicht am WM-Teig ähnlichsten viskoelastischen Eigenschaften auszuwerten ist.

In der Abb. 7.22 sind die Versuchsergebnisse des Kriechversuches von Fraktionsmischungen F2 dargestellt.

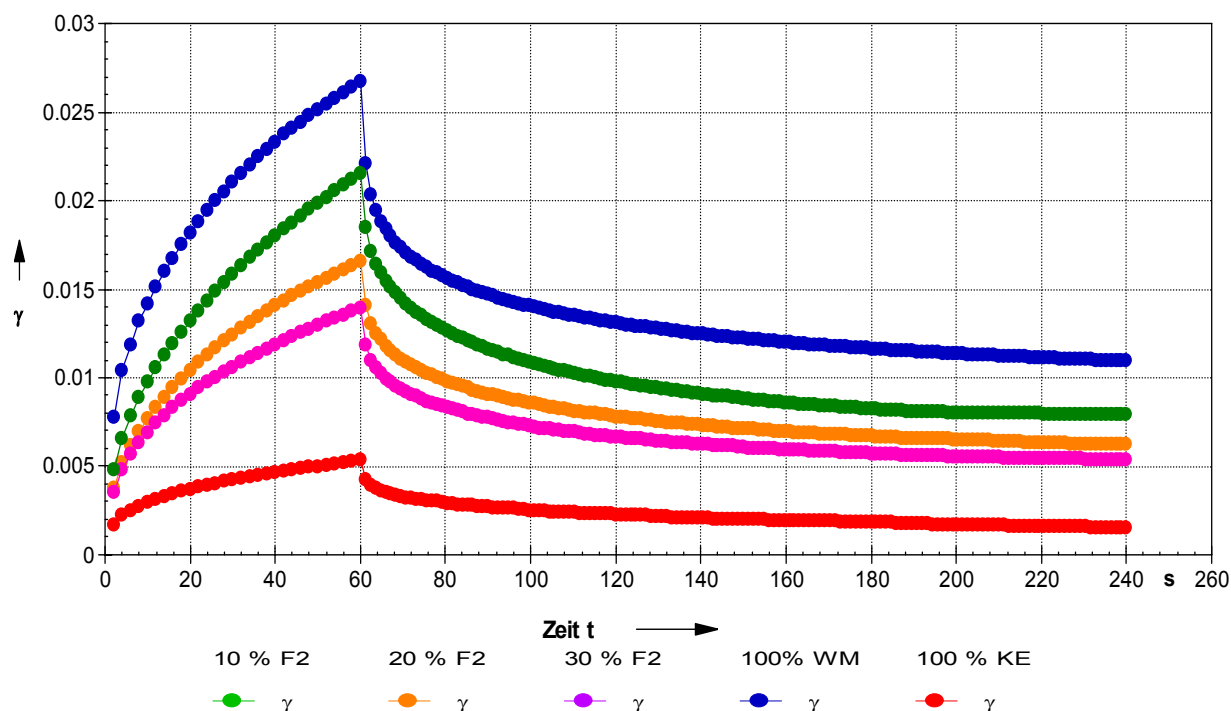


Abb. 7.22: Kriechversuch der Fraktionsmischungen F2 im Vergleich zum WM-Teig

Aus der Abb.7.22 ist deutlich zu erkennen, dass die Kriechkurven von Fraktionsmischungen F2 unterhalb des WM-Teigs verlaufen. Bei Zumischung der F2 verändert sich das Strukturentwicklungsmechanismus, was in erste Linie auf die Partikelspektrumsänderung schließen lässt.

Tab. 7.21: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mehlmischungen mit F2

Probe	Rheologische Kennwerte								
	$J_e$ $10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$	$\dot{\gamma}_3$ $10^{-4}$	$\gamma_e$ $10^{-2}$	$\gamma_v$ $10^{-2}$	$\gamma_{\max}$ $10^{-2}$	$\gamma_e / \gamma_{\max}$ %	$\eta_0$ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$G_0$ $\text{Pa}$	$\lambda$ $\text{s}$
WM	31,3	1,99	1,57	1,09	2,67	59	251500	3197	78,7
10 % F2	27,3	1,92	1,36	0,79	2,15	63	275820	3663	75,3
20 % F2	20,6	1,38	1,03	0,62	1,66	62	362610	4854	74,7
30 % F2	17,2	1,15	0,86	0,53	1,39	61	433890	5814	74,6
KE	7,74	0,39	0,38	0,15	0,53	72	1290100	12916	99,9

In Abb. 7.23 ist eine Gegenüberstellung der Kurvenverläufe für Fraktionsmischungen F3 im Vergleich zum WM- und KE-Teig dargestellt.

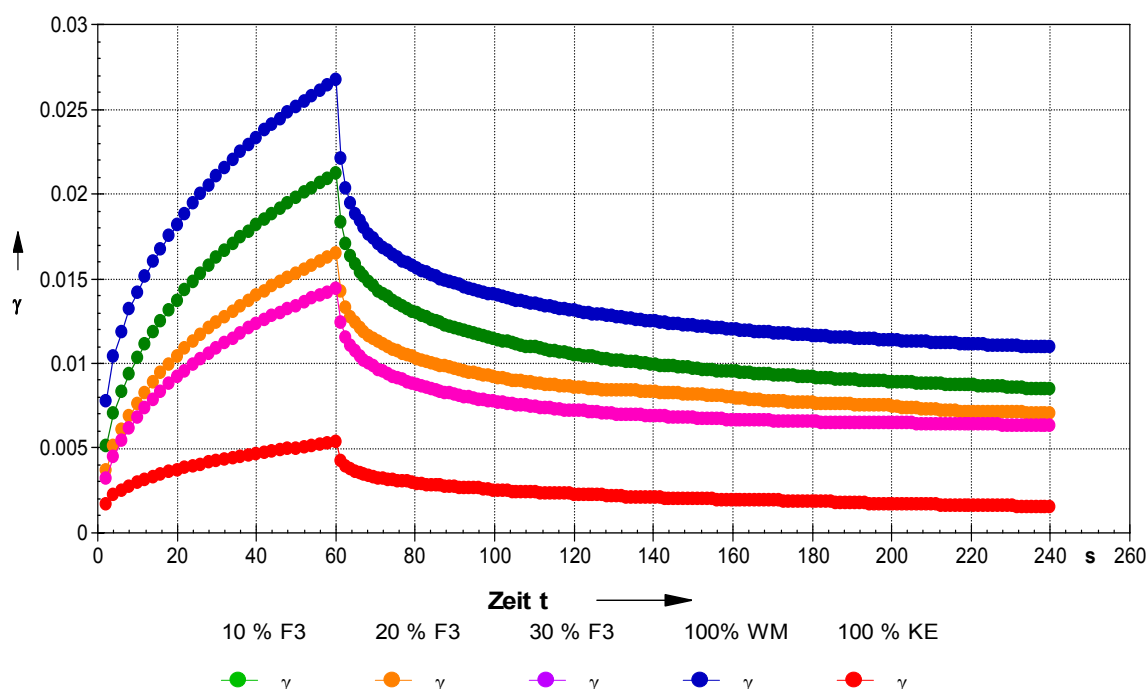


Abb. 7.23: Kriechversuch der Fraktionsmischungen F3 im Vergleich zum WM-Teig

Tab. 7.22: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig sowie deren Mehlmischungen mit F3

Probe	Rheologische Kennwerte								
	$J_e$ $10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$	$\dot{\gamma}_3$ $10^{-4}$	$\gamma_e$ $10^{-2}$	$\gamma_v$ $10^{-2}$	$\gamma_{\max}$ $10^{-2}$	$\gamma_e / \gamma_{\max}$ %	$\eta_0$ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$G_0$ $\text{Pa}$	$\lambda$ $\text{s}$
WM	31,3	1,99	1,57	1,09	2,67	59	251500	3197	78,7
10 % F3	25,2	1,67	1,27	0,85	2,11	60	299930	3968	75,6
20 % F3	18,7	1,32	0,94	0,70	1,64	57	378670	5348	70,8
30 % F3	15,9	1,18	0,81	0,63	1,44	56	425200	6289	67,6
KE	7,74	0,39	0,38	0,15	0,53	72	1290100	12916	99,9

Aus der Abb. 7.23 sowie Tab. 7.22 ist zu entnehmen, dass die grobe Partikulierung der F3 erneut zur Verschlechterung und Schwächung der Strukturentwicklung des Teigs führt.

Die Teigpräparate weisen einen deutlichen Anstieg der Nullviskosität sowie des Schubmoduls auf, was auf erhöhtes Feststoffverhalten und geringere Flieseigenschaften des Teigs nachweist.

In Abb. 7.24 ist eine Gegenüberstellung der Kurvenverläufe für reine KE-Fractionen mit unterschiedlichen Partikelgrößen F1, F2 und F3 im Vergleich zum reinen WM- und KE-Teig dargestellt.

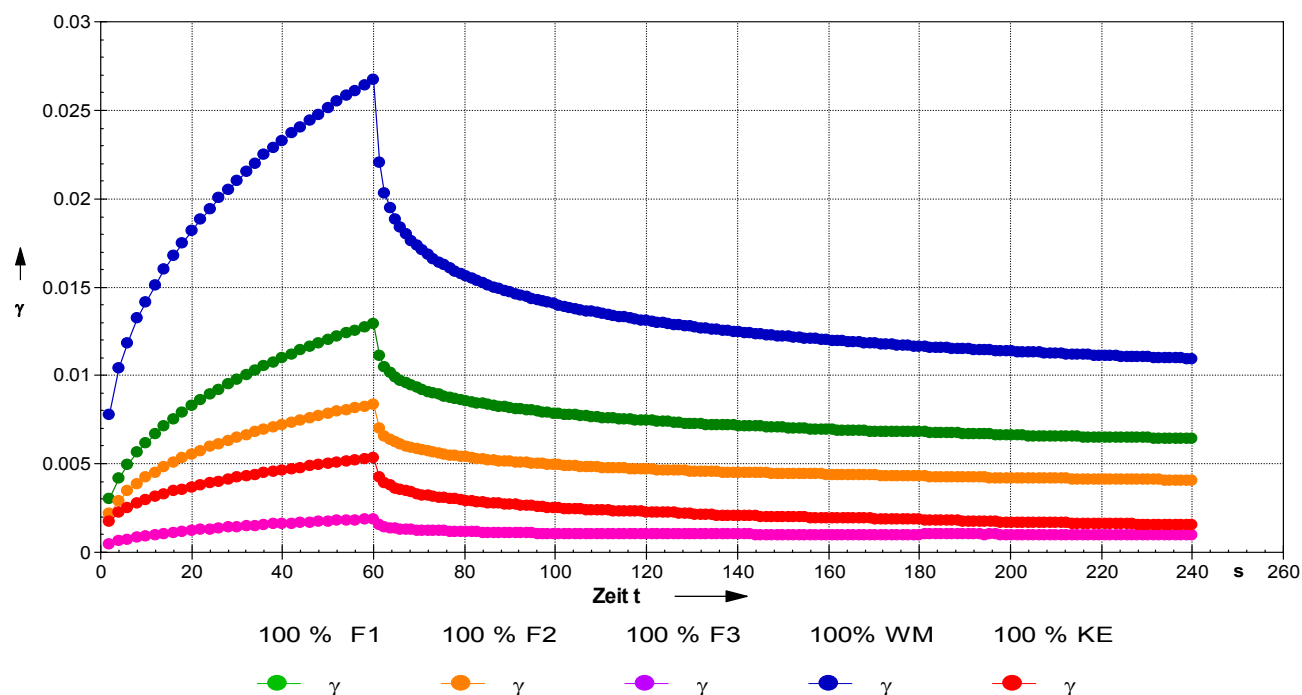


Abb. 7.24: Kriechversuch der Fraktionen F1, F2 und F3 im Vergleich zum WM- und KE-Teig

In Abb. 7.24 wird nachgewiesen, dass die viskoelastischen Eigenschaften des Teigs nicht nur von der Kleberproteinbildung abhängig sind, sondern auch stark von dem Partikelspektrum der eingesetzten Mehle. Mit zunehmender Partikelgröße des Mehls verringern sich maximale Deformation und viskoelastische Komplianz. Die Nullscherviskosität und der Schubmodul erhöhen sich erheblich mit zunehmender Partikelgröße. Die Werte in Tab. 7.23 formalisieren die Kriechdaten aus der Abb. 7.24.

Tab. 7.23: Kriechversuchsdaten Vergleich WM- und KE-Teig sowie KE-Fraktionen F1, F2 und F3

Probe	Rheologische Kennwerte								
	$J_e$ $10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$	$\dot{\gamma}_3$ $10^{-4}$	$\gamma_e$ $10^{-2}$	$\gamma_v$ $10^{-2}$	$\gamma_{\max}$ $10^{-2}$	$\gamma_e / \gamma_{\max}$ %	$\eta_0$ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$G_0$ $\text{Pa}$	$\lambda$ $\text{s}$
WM	31,3	1,99	1,57	1,09	2,67	59	251500	3197	78,7
100 % F1	12,9	1,06	0,65	0,64	1,29	50	468930	7752	60,5
100 % F2	8,49	0,63	0,43	0,41	0,84	51	795630	11779	67,5
100 % F3	1,79	0,14	0,09	0,09	0,18	50	3478400	55866	62,3
KE	7,74	0,39	0,38	0,15	0,53	72	1290100	12916	99,9

Die statistische Analyse der untersuchten Teige zeigt einen hochsignifikanten Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen den WM-Teig und KE-Teig sowie die Mehlmischungen mit 10 %, 20 % und 30 % KE-Mehl. Kein signifikanter Unterschied ( $p > 0,05$ ) wurde zwischen den Mischung mit 20 % und 30 % KE-Mehl festgestellt.



### 7.3. Ermittlung der Einflussparameter auf Verarbeitungsverhalten von Teigen

Nachfolgend wird die Auswirkung der Einflussgrößen (Temperatur, Schüttwassermenge und Salzkonzentration) auf die teigrheologischen Eigenschaften ermittelt und materialwissenschaftlich bewertet.

#### 7.3.1. Einfluss der Temperatur

Aus materialwissenschaftlichem Interesse wurden die Oszillationsmessungen von Teigen bei verschiedenen Temperaturen im technologisch interessierenden Bereich von 15 °C, 25 °C, 30 °C und 40 °C durchgeführt. Eine weitere Erhöhung der Temperatur über 40 °C erschwert die Verarbeitungsfähigkeit des Teigs (aus technologischen Sicht nicht mehr relevant), was auf Denaturierung der Proteine und Verkleisterung der Stärke zurückzuführen ist. (siehe Punkt 7.1.3).

##### 7.3.1.1. Amplitudensweepmessungen

Mit Hilfe der AS-Messung wird die Festigkeit bzw. Steifigkeit der Teigmatrix bewertet sowie der LVB für die nachfolgenden FS-Messungen ermittelt. In Abb. 7.25 erfolgt eine Zusammenstellung von  $G'$ ,  $G''$  und  $\tan \delta$  für die Teige aus den reinen Komponenten.

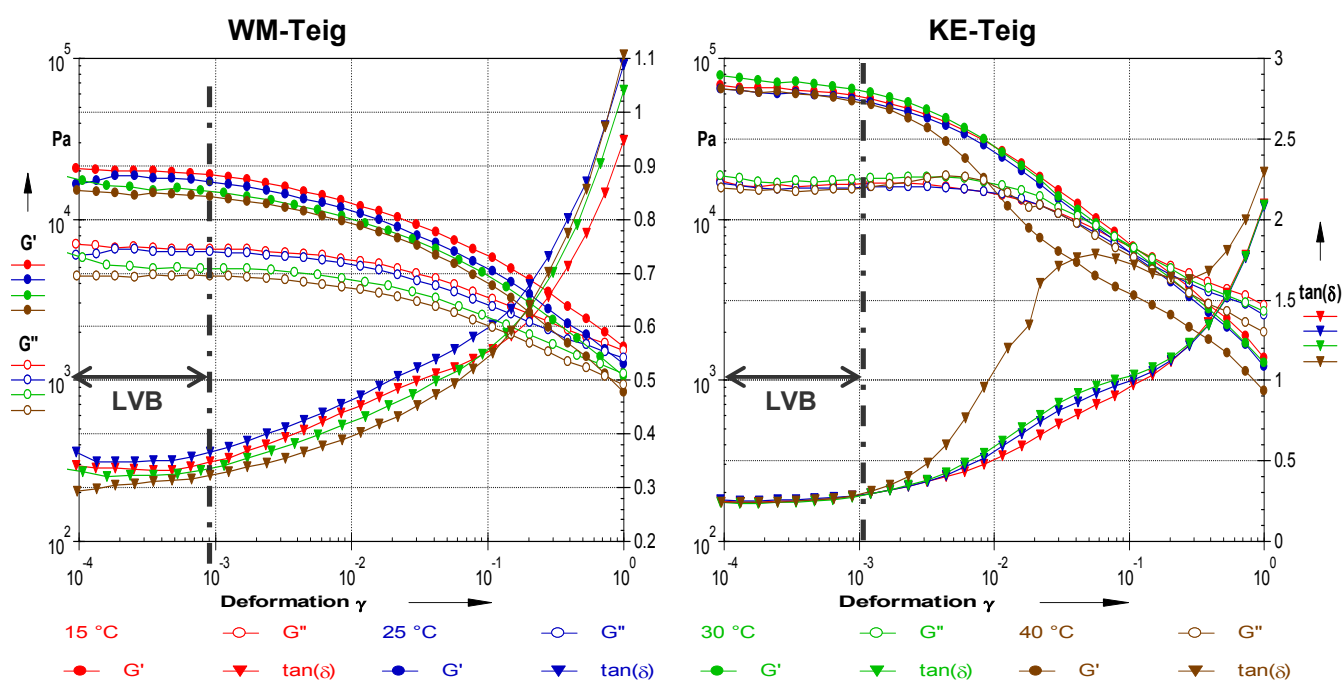


Abb. 7.25: Amplitudensweep Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Messtemperaturen

Beim KE-Teig kam es während der Messung bei  $T \geq 40$  °C zu einem Silikonöleinzug in die Matrix, was den Messverlauf beeinflusste.

Anhand der in Abb. 7.25 dargestellten Messkurven sowie in der Tab. 7.24 aufgeführte Messdaten ist zu erkennen, dass die Messtemperatur beim WM-Teig im Vergleich zum KE-Teig einen stärkeren Einfluss ausübt, welche durch einen positiven Einfluss der Temperatur auf die Kleberproteinbildung infolge

Interaktion über Wasserstoffbrückenbindungen zu erklären ist. Es gilt folgendes Ranking für den Speichermodul:

WM-Teig 15 °C > WM-Teig 25 °C > WM-Teig 30 °C > WM-Teig 40 °C

Eine Zusammenfassung der Messdaten findet in Tab. 7.24. statt.

Tab. 7.24: AS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Temperaturen

Probe	$\gamma = 10^{-3}$	$G'$ 10 <sup>4</sup> Pa				$G''$ 10 <sup>4</sup> Pa				tan $\delta$			
	Temperatur °C	15	25	30	40	15	25	30	40	15	25	30	40
WM		1,89	1,72	1,61	1,38	0,66	0,63	0,52	0,45	0,35	0,37	0,32	0,32
KE		5,89	5,58	6,42	4,45	1,66	1,58	1,76	1,55	0,28	0,28	0,27	0,28

Von Auswertungsinteresse ist der Vergleich der Moduli sowie des tan  $\delta$  als schärfsten Indikator der Strukturstabilität. Das Optimum der Verarbeitungsfähigkeit des WM-Teigs liegt bei einer Temperatur von 25 °C vor, siehe tan  $\delta$  (0,37. Im Vergleich zum WM-Teig zeigt tan  $\delta$  bei KE-Teig kaum eine Veränderung und bleibt im Verlauf der Messung nahezu konstant mit ca. 0,28 (fest, steif und spröde als Materialeigenschaft). In Abb. 7.26 erfolgt eine Zusammenstellung von  $G'$ ,  $G''$  und tan  $\delta$  für die Mehlmischungen (10, 20 und 30 % KE) in Abhängigkeit von Messtemperaturen.

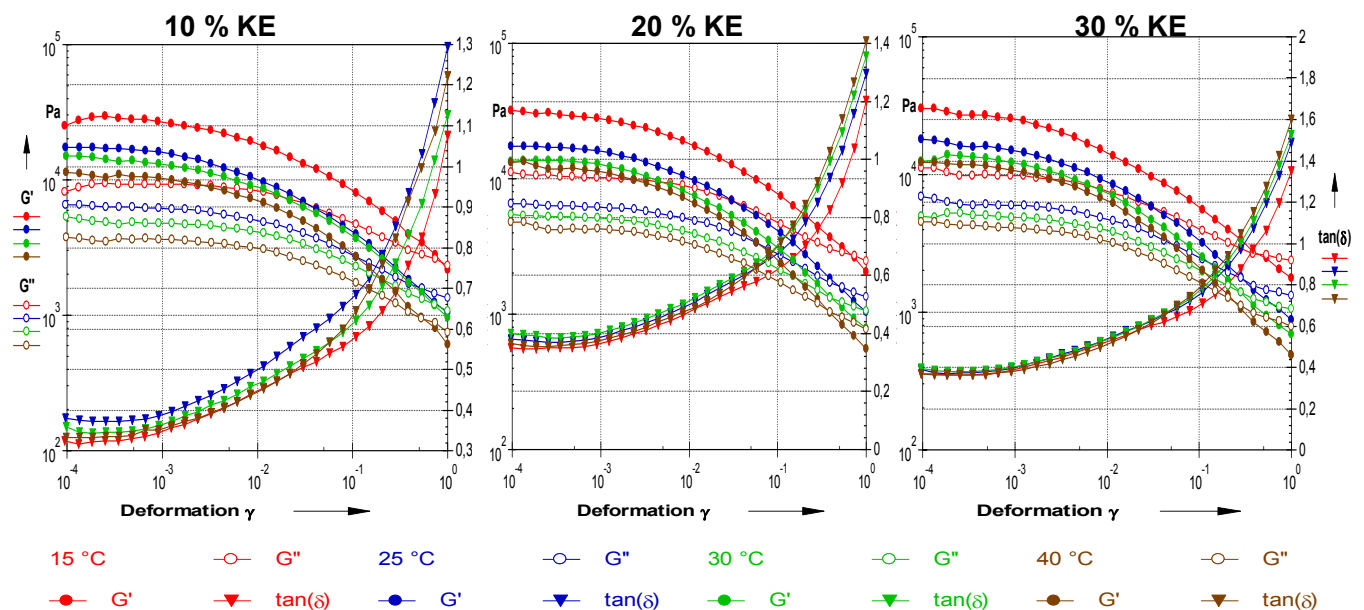


Abb. 7.26: Amplitudensweep Vergleich der Mehlmischungen bei unterschiedlichen Messtemperaturen

Für die Mehlmischungen ergeben sich analoge Aussagen wie bei WM-Teig. Trotz Zugabe des KE-Anteils in drei verschiedene Mischverhältnisse zu WM-Mehl verhalten sich die Teige in Abhängigkeit von Messtemperatur ähnlich wie bei WM-Teig, was auf die Dominanz des WM-Anteils im Teigsystem zurückzuführen ist. In Tab 7.25 sind charakteristische Größen aus den Messkurven zusammengefasst.

Tab. 7.25: AS-Messung Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Temperaturen

Probe	$\gamma = 10^{-3}$ Temperatur °C	G' 10 <sup>4</sup> Pa				G'' 10 <sup>4</sup> Pa				tan $\delta$			
		15	25	30	40	15	25	30	40	15	25	30	40
WM		1,89	1,72	1,61	1,38	0,66	0,63	0,52	0,45	0,35	0,37	0,32	0,32
10 % KE		2,71	1,60	1,32	1,03	0,93	0,62	0,48	0,36	0,34	0,39	0,36	0,35
20 % KE		2,81	1,62	1,29	1,14	1,02	0,64	0,51	0,43	0,36	0,38	0,40	0,37
30 % KE		2,68	1,57	1,27	1,12	1,00	0,61	0,49	0,43	0,38	0,40	0,40	0,38
KE		5,89	5,58	6,42	4,45	1,66	1,58	1,76	1,55	0,28	0,28	0,27	0,28

### 7.3.1.2. Frequenzsweepmessung

Zur Charakterisierung der Teige als Stoffsysteme wurde das frequenzabhängige Verhalten des WM- und KE-Mehls sowie die Mehlmischungen bei gleichen Temperaturen untersucht. Die im Frequenzsweep ermittelten Messdaten werden in Abb. 7.27 dargestellt.

Die Kurven der Moduli verlaufen im gesamten Frequenzbereich nahezu parallel. Über den gesamten Messbereich ist ein frequenzabhängiger Anstieg von G' und G'' als Dispersionsstruktur zu erkennen.

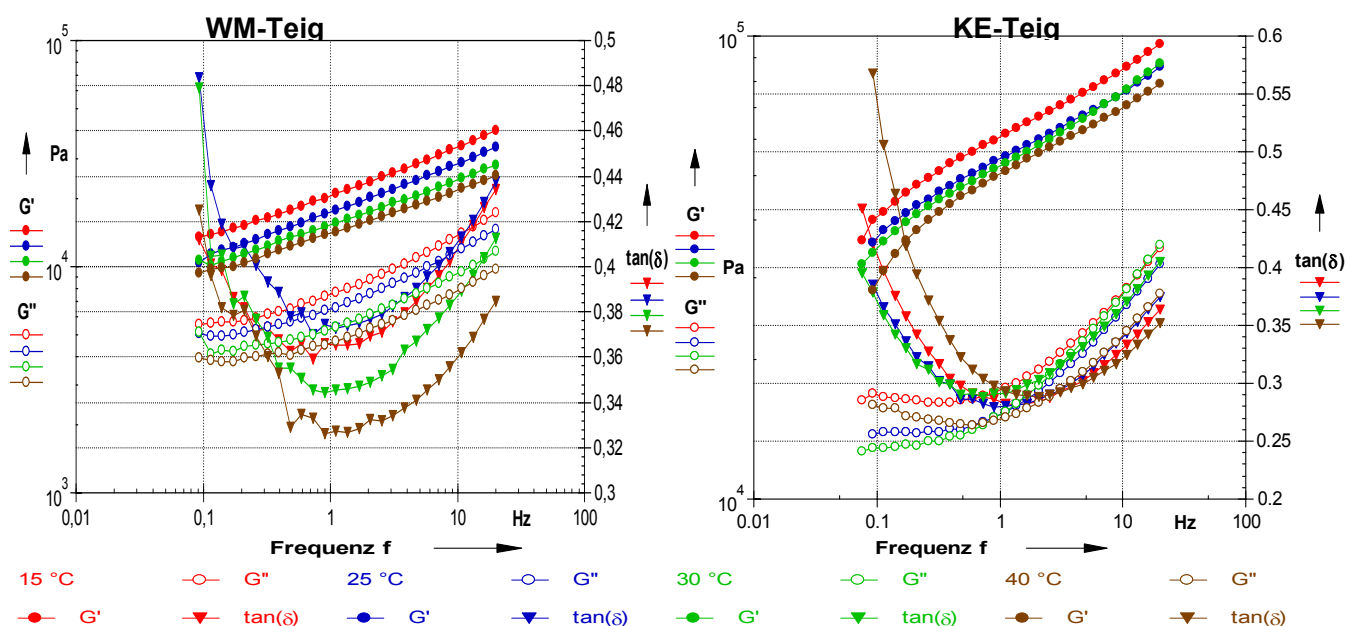


Abb. 7.27: Frequenzsweep Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Messtemperaturen

Aus der Abb. 7.27 geht hervor, dass die Temperaturführung für die Verarbeitungseigenschaften des Teigs im Prozessverlauf Bedeutung besitzt. Für den WM- und KE-Teig wurden die charakteristischen Parameter aus dem Frequenzsweep in Tab. 7.26 aufgeführt.

Die Veränderung der komplexen Viskosität mit der Temperatur charakterisiert das mögliche Verarbeitungsverhalten auf der Linie.

Tab. 7.26: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Temperaturen

Probe	Temperatur ° C	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
		Koeffizient $G'_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\alpha$	Koeffizient $G''_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\gamma$	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4\text{ Pa} \cdot \text{s}$	$ G^* $ $10^4\text{ Pa}$
WM	15	2,09	0,208	0,75	0,200	0,36	0,33	2,24
	25	1,75	0,219	0,64	0,201	0,37	0,29	1,89
	30	1,54	0,198	0,53	0,177	0,35	0,25	1,66
	40	1,41	0,194	0,46	0,166	0,33	0,22	1,50
KE	15	5,99	0,149	1,71	0,109	0,28	0,88	6,03
	25	5,37	0,153	1,51	0,130	0,28	0,80	5,42
	30	5,21	0,160	1,50	0,166	0,29	0,78	5,33
	40	4,88	0,174	1,48	0,074	0,30	0,75	4,95

Der Speichermodul des WM-Teigs verändert sich mit Temperaturerhöhung und weist Temperaturabhängigkeit der Glutenausbildung nach. ( $14100\text{ Pa}/20900\text{ Pa} = 0,67$ ). Der Abfall der Moduli beim WM-Teig mit Erhöhung der Temperaturen kann auf eine Reduzierung der Wechselwirkungen durch erhöhte Wassermolekülflexibilität im Kleberprotein zurückgeführt werden. Der Frequenzsweepverlauf des KE-Teigs mit steigender Frequenz ist stetig steigend und verläuft ähnlich wie beim WM-Teig, jedoch auf einem vierfach höheren Level der Moduli. Er stellt sich vergleichsweise steif und inhomogen dar. Es wurde im Gegensatz zu Weizenteig keine wesentliche Änderung der Moduli mit Erhöhung der Temperatur beim KE-Teig im Vergleich zum WM-Teig ermittelt. ( $48800\text{ Pa}/59900\text{ Pa} = 0,81$ ) Der Kurvenverlauf des  $\tan \delta$  sowohl beim WM-Teig als auch beim KE-Teig hat einen alternierenden Verlauf heraus und weist das Minimum bei einer Frequenz von 1 Hz auf. In Abb. 7.28 ist die resultierende  $G'$  und  $G''$  –Kurve sowie  $\tan \delta$  für Mischverhältnisse (10, 20 und 30 % KE) in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

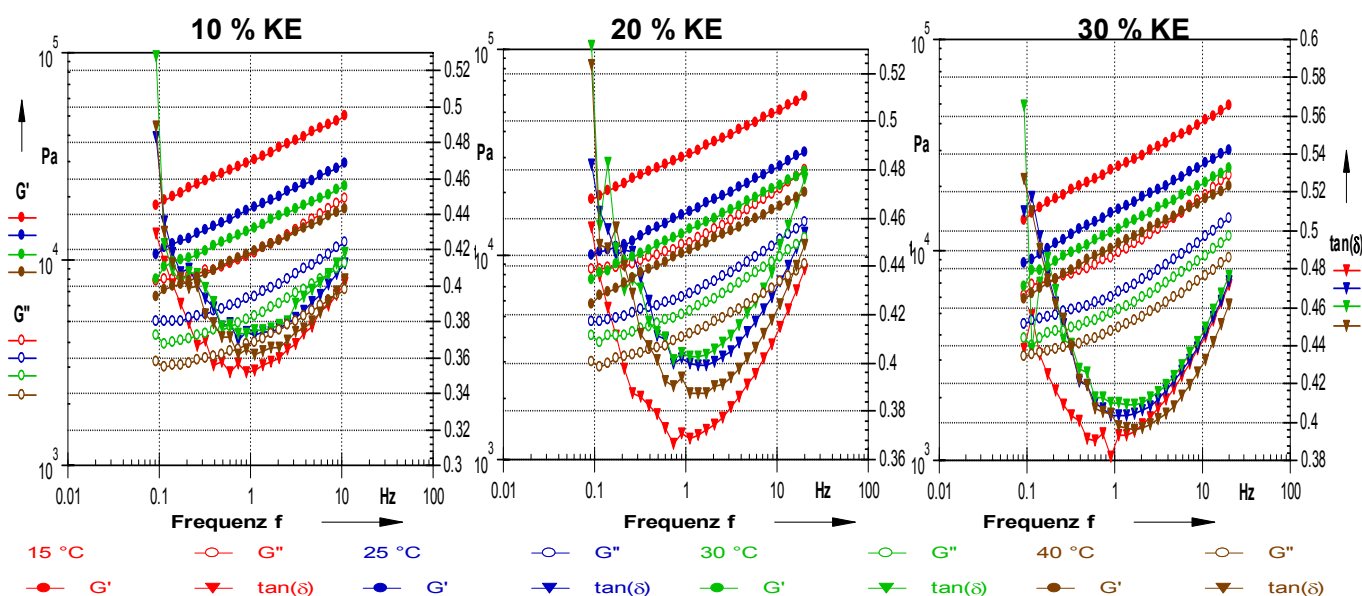


Abb. 7.28: Frequenzsweep Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Messtemperaturen

Aus der Abb. 7.28 geht hervor, dass bei allen Mischungen bei hohen Frequenzen die Festkörpereigenschaften am stärksten ausgeprägt sind. In Abhängigkeit von Temperaturen ist die Abnahme des Speicher- und Verlustmoduls im Temperaturbereich von 15 °C bis 25 °C am größten. Da der WM-Anteil in den Mischungen dominant ist, verhalten sich die Mischungen nahezu ähnlich wie WM-Teig. Für die Teige aus Mehlmischungen wurden die charakteristischen Parameter des Frequenzsweeps in Tab. 7.27 aufgelistet.

Tab. 7.27: FS-Messung Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Temperaturen

Probe	Temperatur ° C	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
		Koeffizient $G'_{1\text{ Hz}}$ 10 <sup>4</sup> Pa	x	Koeffizient $G''_{1\text{ Hz}}$ 10 <sup>4</sup> Pa	y	tan $\delta$	$ \eta^* $ 10 <sup>4</sup> Pa · s	$ G^* $ 10 <sup>4</sup> Pa
10 % KE	15	2,99	0,215	1,06	0,209	0,36	0,46	3,03
	25	1,75	0,219	0,45	0,203	0,37	0,28	1,85
	30	1,39	0,212	0,52	0,201	0,38	0,23	1,52
	40	1,07	0,212	0,39	0,199	0,36	0,19	1,15
20 % KE	15	2,95	0,209	1,10	0,203	0,37	0,47	3,01
	25	1,59	0,219	0,63	0,205	0,40	0,26	1,62
	30	1,29	0,218	0,52	0,208	0,40	0,20	1,34
	40	1,02	0,215	0,40	0,205	0,39	0,16	1,09
30 % KE	15	2,42	0,207	0,95	0,202	0,39	0,39	2,55
	25	1,51	0,215	0,61	0,204	0,41	0,25	1,63
	30	1,23	0,211	0,51	0,202	0,42	0,20	1,32
	40	1,03	0,211	0,41	0,195	0,40	0,16	1,09

Eine optimale Teigqualität am Beispiel von Strukturausbildung und Strukturstabilität wird in allen Messanstellungen bei 25 °C nachgewiesen (siehe Größe Exponent x) und damit Erfahrungswerte aus der Bäckerei bestätigt.

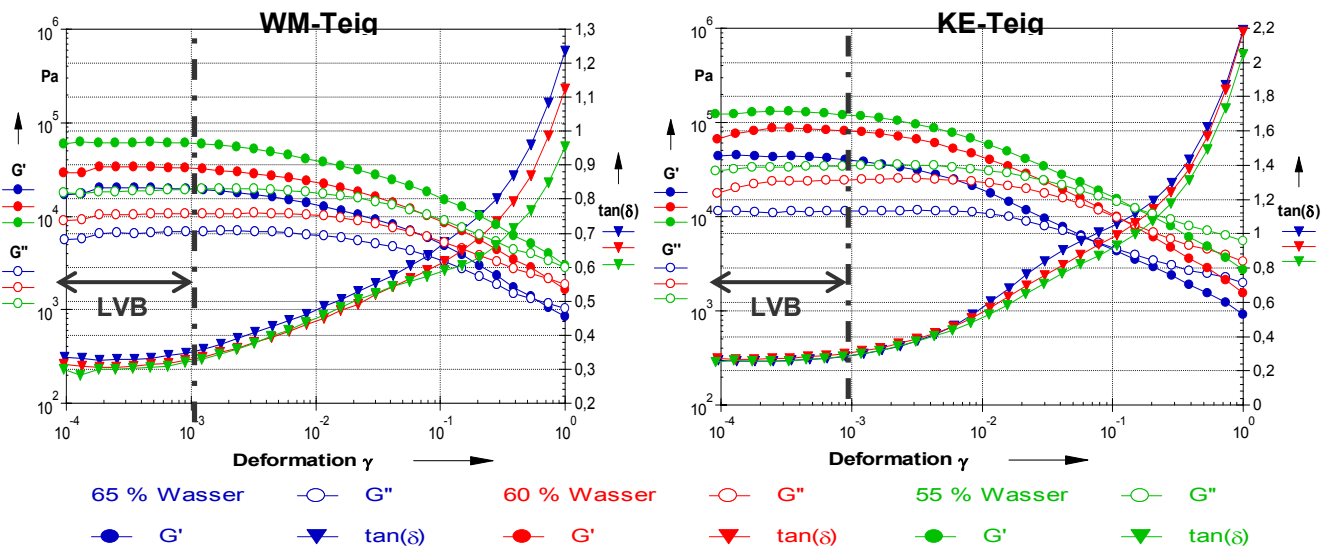
### 7.3.2. Einfluss der Schüttwassermenge

Der sichere Betrieb von Teigformtechnik hängt von der optimalen Einstellung der rheologischen Parameter ab. Im Wesentlichen handelt es sich bei der Teigformtechnik um eine Volumendosierung, obwohl eine Massedetermination das technologische Ziel ist.

Die Wassermenge wurde im Bereich  $55 \leq TA \leq 65$  % so variiert ( $T = 25$  °C Isotherme), dass in jedem Teig sowohl die optimale Konsistenz entsprechend der Wasseraufnahme im Farinographen als auch unterschiedliche Teigkonsistenzen infolge höherer und niedrigerer Teigausbeuten erreicht werden.

#### 7.3.2.1. Amplitudensweepmessungen

In Abb. 7.29 sind am Beispiel der AS-Messungen der Speicher- und Verlustmodul sowie der Verlustfaktor für WM- und KE-Teig aufgetragen.

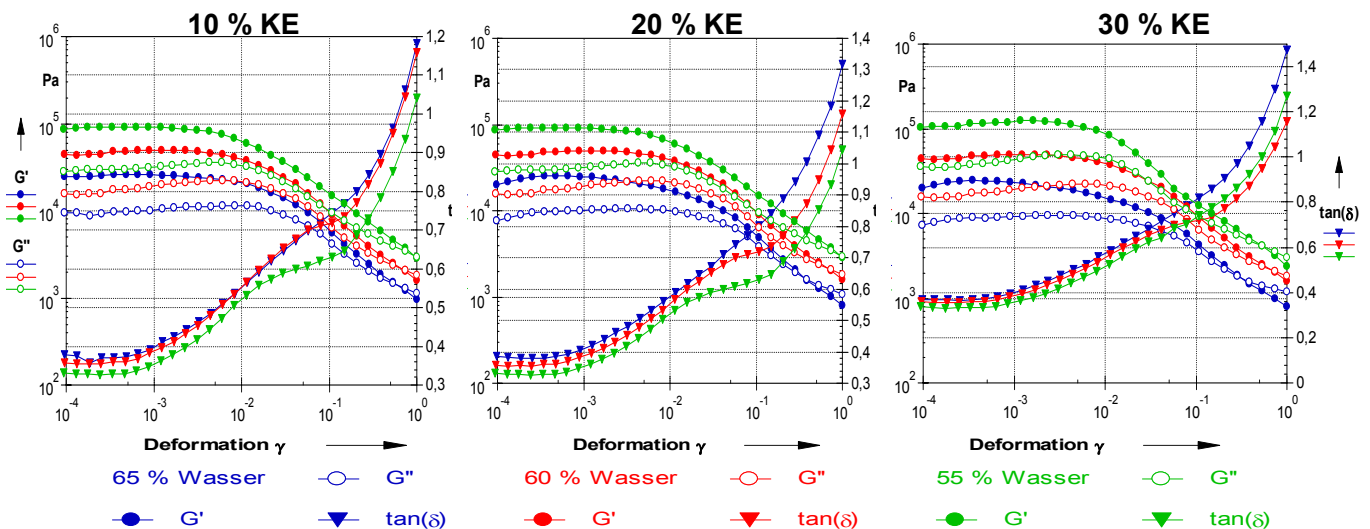


Aus der Abb. 7.29 ist zu erkennen, dass sich mit zunehmendem Wasseranteil im Teigsystem die Moduli in Richtung zunehmender **Viskoelastizität** verringern. Aus den in Abb. 7.29 dargestellten deformationsabhängigen dynamischen Moduli wurden die Werte der Tab. 7.28 ermittelt.

Tab. 7.28: AS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Wasseranteilen

Rheologische Kennwerte		G' 10 <sup>4</sup> Pa			G'' 10 <sup>4</sup> Pa			tan δ		
Deformation	Wasseranteil %	55	60	65	55	60	65	55	60	65
$\gamma = 10^{-3}$	WM	6,85	4,12	1,98	2,15	1,22	0,68	0,31	0,31	0,35
	KE	12,1	8,12	4,04	3,43	2,42	1,15	0,28	0,29	0,29

In Abb. 7.30 erfolgt eine Zusammenstellung von G' und G'' sowie tan δ der drei Teigpräparationen bei unterschiedlichen Wasseranteilen.





Ähnliches Verhalten weisen die Teige aus Mischungen in Abhängigkeit von der Wassermenge auf, da der WM-Anteil im Teigsystem dominant ist.

Tab. 7.29: AS-Messung Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Wasseranteilen

$\gamma = 10^{-3}$		$G'$ $10^4$ Pa			$G''$ $10^4$ Pa			$\tan \delta$		
Probe	Wasseranteil %	55	60	65	55	60	65	55	60	65
10 % KE		8,95	4,90	2,28	3,18	1,81	0,88	0,35	0,37	0,38
20 % KE		9,01	4,91	2,52	3,26	1,91	0,96	0,36	0,38	0,38
30 % KE		11,7	4,96	2,78	4,19	1,97	1,10	0,36	0,39	0,40

Mit einer Erhöhung des Wasseranteils von 5 % verringern sich die Werte des Speichermoduls jeweils um ca. 50 %, was eine erhebliche Auswirkung der Wasserdosierungsänderung auf das Verarbeitungsverhalten des Teigs nachweist.

### 7.3.2.2. Frequenzsweepmessung

In Abb. 7.31 sind die Messkurvenverläufe von  $G'$  und  $G''$ , sowie  $\tan \delta$  für WM- und KE-Teig bei unterschiedlicher Wasserzugabe dargestellt. ( $55 \leq TA \leq 65$  %,  $T = 25$  °C)

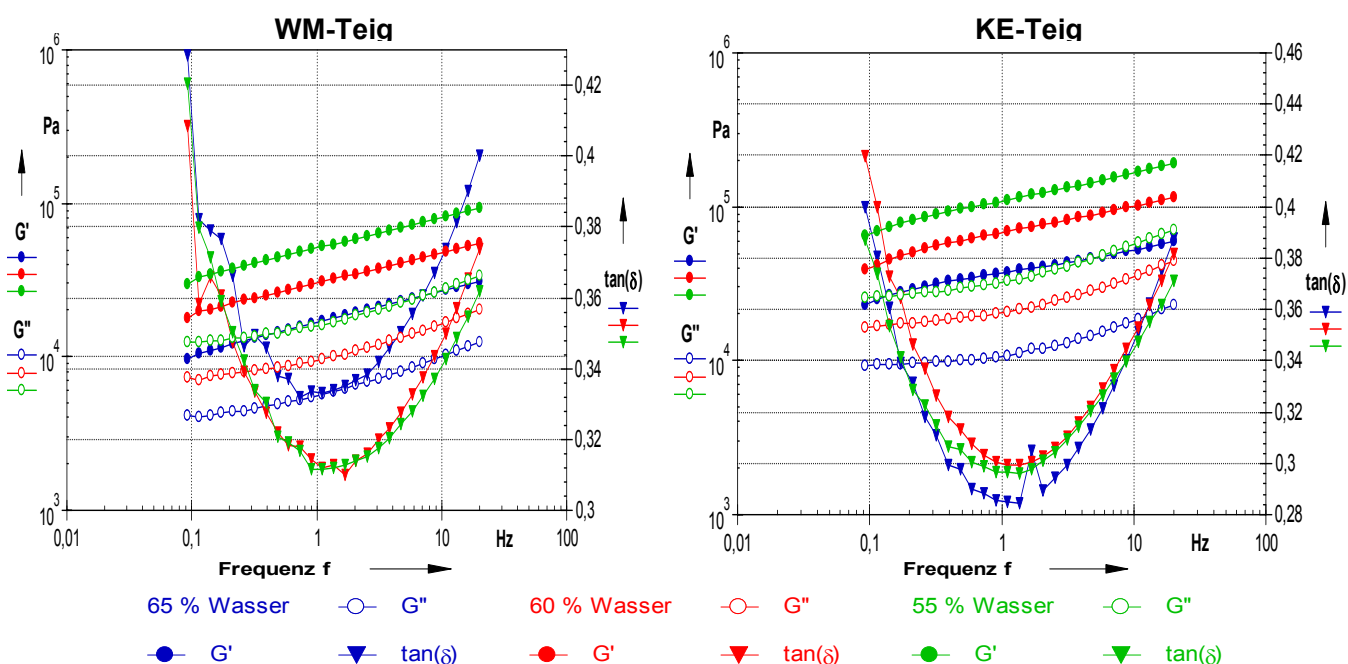


Abb. 7.31: Frequenzsweep Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Wasseranteilen

Für alle Teige ist über den gesamten Messbereich einen frequenzabhängigen Anstieg von Speicher- und Verlustmodul zu erkennen. Der Level von  $G'$  und  $G''$  sinkt in Abhängigkeit von der Wassermenge ab. Die elastischen Eigenschaften des Teigs werden entsprechend der Schüttwassergabe reduziert. Ein optimaler

Bereich von ca. 62 % TA wird bestätigt [135, 136, 137, 138, 139]. Eine Zusammenfassung der Messdaten vom WM-Teig im Vergleich zum KE-Teig findet in Tab. 7.30 statt.

Tab. 7.30: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Wasseranteilen

Probe	Wasseranteil %	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
		Koeffizient $G'_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\chi$	Koeffizient $G''_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\gamma$	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4\text{ Pa} \cdot \text{s}$	$ G^* $ $10^4\text{ Pa}$
WM	55	5,07	0,215	1,56	0,190	0,31	0,72	5,15
	60	3,02	0,217	0,93	0,196	0,31	0,44	3,10
	65	1,67	0,229	0,56	0,209	0,33	0,25	1,73
KE	55	10,8	0,158	3,18	0,147	0,29	1,63	10,9
	60	6,85	0,166	2,02	0,158	0,29	1,01	7,01
	65	3,66	0,167	1,06	0,162	0,29	0,56	3,74

Die Reduzierung der Festkörpereigenschaften beim KE-Teig geschieht aufgrund der erhöhten Wasserbindekazapazität der Proteine und der Pentosane, die jedoch kein Netzwerk aufbauen. Die vorhandene trockene Coulombsche Reibung zwischen den Partikel wird schüttwasserabhängig reduziert. Die Teigmatrix stellt sich homogener dar. Im Vergleich zum KE-Teig weist WM-Teig höhere Exponentenwerte auf, was eine stabilere Struktur des Teigs nachweist. Der KE-Teig bildet eine eigenständige Versuchsklasse ab.

In Abb. 7.32 sind die Messverläufe für die Mischverhältnisse (10, 20 und 30 % KE) in Abhängigkeit vom Wasseranteil dargestellt.

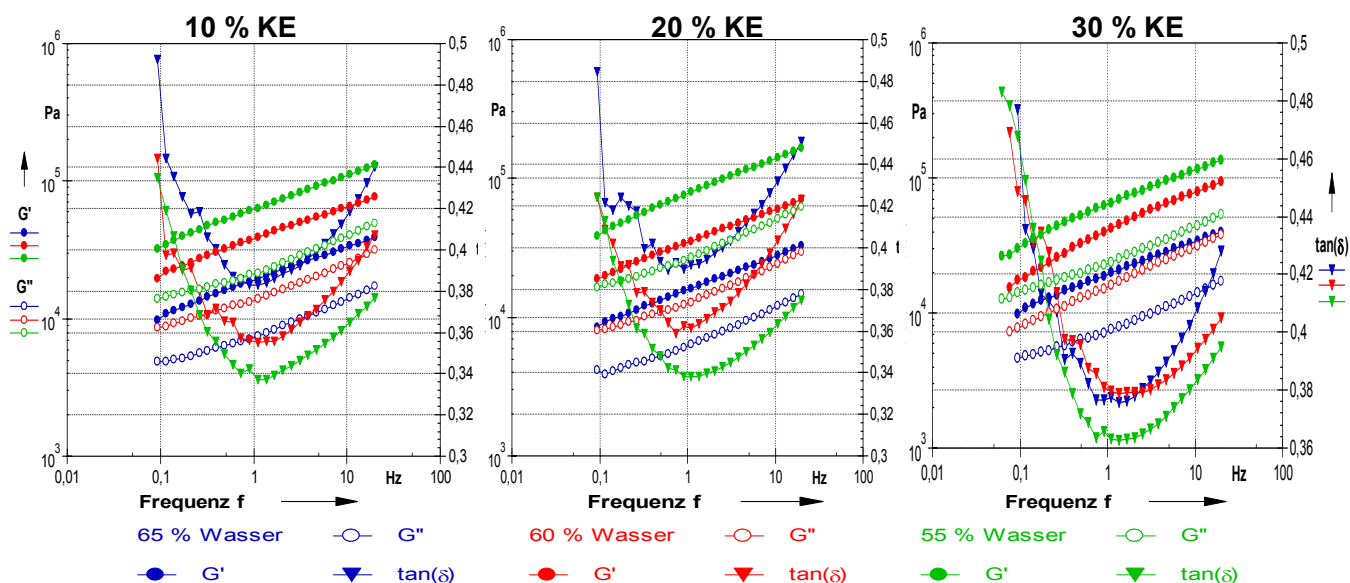


Abb. 7.32: Frequenzsweep Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Wasseranteilen

Die Messverläufe der vorhergehenden FS-Messungen werden bestätigt. In Tab. 7.31 sind charakteristische Größen aus den Messkurven zusammengefasst.



Tab. 7.31: FS-Messung Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Wasseranteilen

Probe	Wasseranteil %	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
		Koeffizient $G'_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\chi$	Koeffizient $G''_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\gamma$	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4\text{ Pa} \cdot \text{s}$	$ G^* $ $10^4\text{ Pa}$
10 % KE	55	6,18	0,221	2,13	0,206	0,35	1,04	6,21
	60	3,49	0,225	1,27	0,210	0,36	0,59	3,52
	65	1,57	0,227	0,60	0,211	0,38	0,29	1,64
20 % KE	55	6,26	0,222	2,26	0,208	0,36	1,12	6,36
	60	3,78	0,224	1,33	0,212	0,36	0,62	3,91
	65	1,89	0,228	0,71	0,214	0,37	0,33	1,94
30 % KE	55	7,68	0,222	2,66	0,208	0,35	1,35	7,81
	60	3,96	0,225	1,49	0,213	0,37	0,79	4,01
	65	1,91	0,229	0,73	0,215	0,38	0,37	1,96

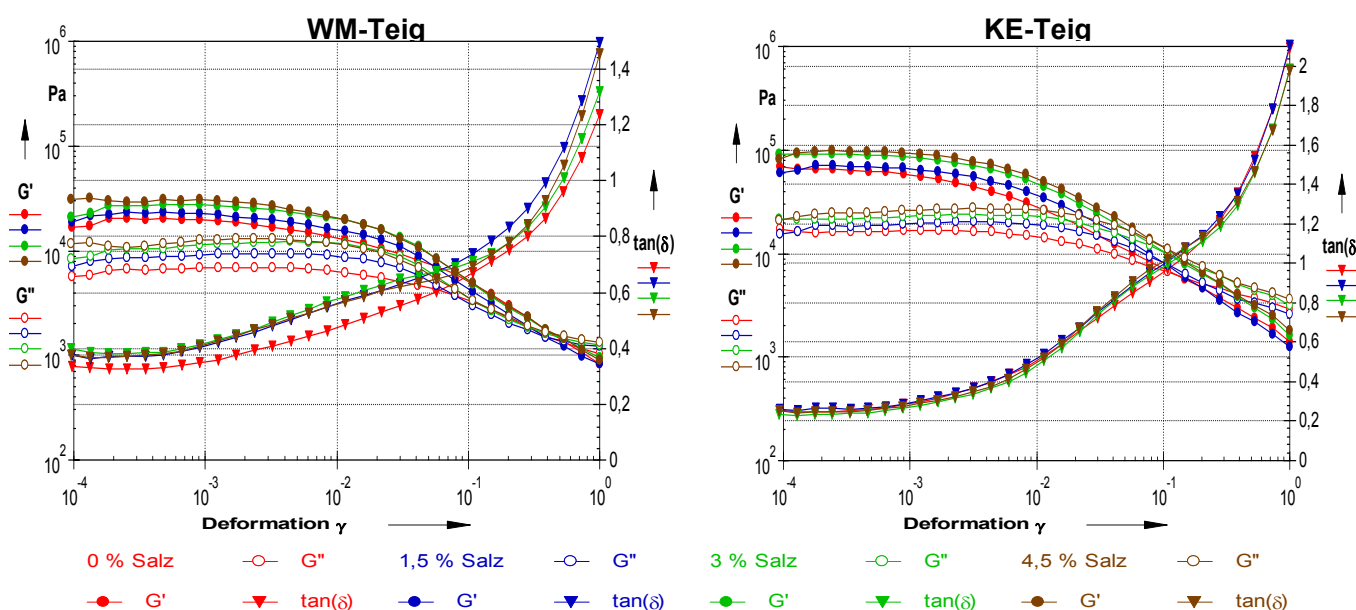
Allgemein ist festzustellen, dass die Strukturstabilität sowohl bei WM-Teig als auch bei den Mischungen mit zunehmender Wasserzugabe ansteigt. Dagegen sinkt der Absolutwert (Basiswert  $G'_{1\text{ Hz}}$ ) in Abhängigkeit von der Schüttwassermenge ab.

### 7.3.3. Einfluss der Salzkonzentration

Die jeweilige Salzkonzentration und deren Einfluss auf teigrheologische Eigenschaften wird im Bereich  $0 \leq \text{SK} \leq 4,5\%$  mit  $\Delta \text{SK} = 1,5\%$  variiert ( $T = 25\text{ °C}$ ) und materialwissenschaftlich bewertet.

#### 7.3.3.1. Amplitudensweepmessungen

In Abb. 7.33 sind am Beispiel der AS-Messungen Moduli für WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen aufgetragen.



Mit zunehmendem Salzgehalt im Teigsystem erhöhen sich die Moduli beider Teige und zeigen ein erhöhtes Kurvenlevel an, was im Wesentlichen auf die Änderung der Wasserinteraktionen der Glutenkonfiguration beim WM-Teig zurückzuführen ist. Glutenprotein ist die grundsätzliche Komponente des Backvorgangs und es wird wesentlich durch die Salzkonzentration beeinflusst.

Mit Erhöhung der Salzkonzentration verbessert sich der Hydratationsprozess, was durch die Umhüllung des Glutens insgesamt mit positiven Ladungen durch Salzzugabe zu erklären ist. Die elektrostatische Repulsion reduziert die Abstoßung und lässt die Proteine in engeren Kontakt treten, was zu einer Erhöhung der Elastizität des Teigs führt. Der Salzgehalt hat einen entscheidenden Einfluss auf die Protein-Protein- Interaktionen über die Wasserstoffbrückenbildungen und die Entwicklung des Teiges. [135]. Die Wasserbindekapazität der Pentosane steigt durch eine Erhöhung der Ionenkonzentration analog an.

In Tab. 7.32 erfolgt eine Zusammenstellung der dynamischen Kennwerte für WM- und KE-Teig in Abhängigkeit von der Salzkonzentration.

Tab. 7.32: AS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen

Deformation	Probe Salz %	G' 10 <sup>4</sup> Pa				G'' 10 <sup>4</sup> Pa				tan δ			
		0	1,5	3	4,5	0	1,5	3	4,5	0	1,5	3	4,5
$\gamma = 10^{-3}$	WM	1,91	2,19	2,69	3,02	0,69	0,92	1,16	1,28	0,36	0,42	0,43	0,43
	KE	5,57	6,45	8,30	9,11	1,67	1,96	2,33	2,64	0,30	0,30	0,28	0,29

Zusätzlich zur Erhöhung des Speichermoduls nimmt der  $\tan \delta$  ebenfalls zu und weist einen homogenen, gut zu verarbeitenden Teig nach, was durch die verbesserten ionischen/hydrophilen Interaktionen in der Matrix zu erklären ist. In Abb. 7.34 werden die AS-Messungen von Mehlmischungen dargestellt.

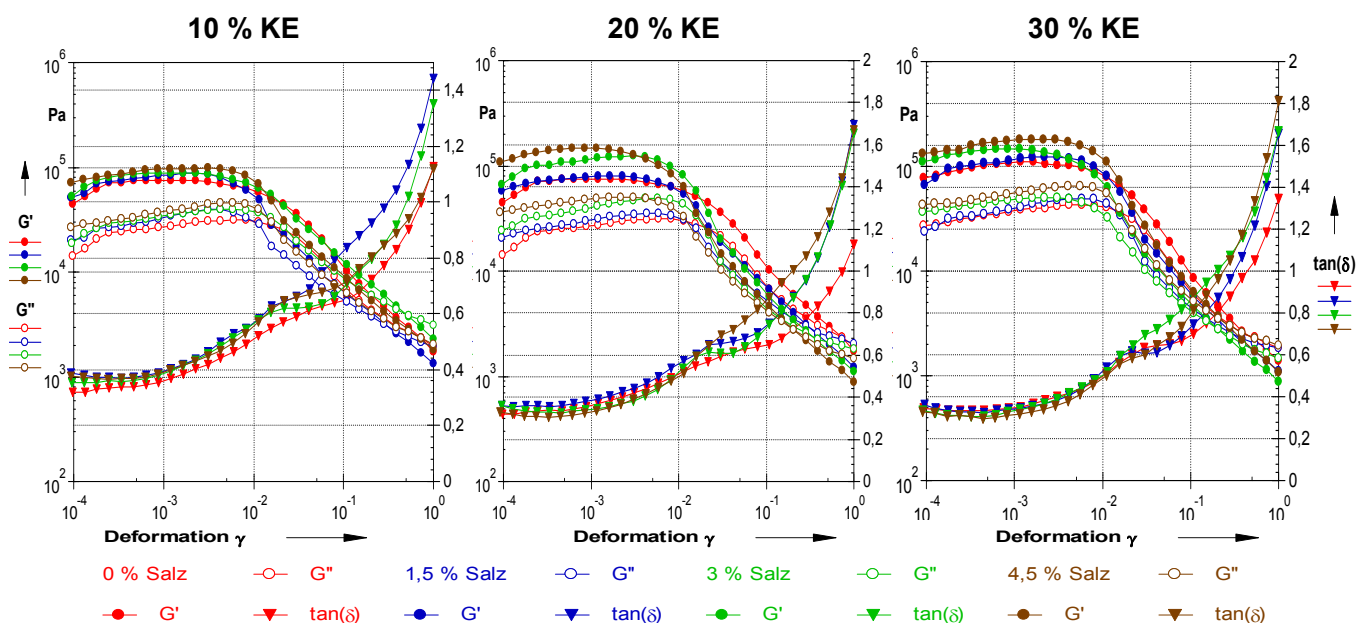


Abb. 7.34: Amplitudensweep Vergleich der Mischungen bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen

Die Messungen für die Mehlpräparationen mit erhöhter Salzmenge von 3 % und 4,5 % zeigen die ausgeprägtesten Festkörpereigenschaften am Beispiel des Speichermoduls. Aus in Abb. 7.34 dargestellten Kennwerten werden in Tab. 7.35 zusammengefasst.

Tab. 7.33: AS-Messung Vergleich der Mischungen bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen

Deformation $\gamma = 10^{-3}$		$G'$ $10^4$ Pa				$G''$ $10^4$ Pa				$\tan \delta$			
Probe	Salz %	0	1,5	3	4,5	0	1,5	3	4,5	0	1,5	3	4,5
10 % KE		7,48	8,47	8,89	9,66	2,76	3,42	3,52	3,84	0,37	0,40	0,40	0,40
20 % KE		7,42	8,02	12,1	14,6	2,76	3,14	4,12	4,92	0,37	0,39	0,35	0,34
30 % KE		11,0	8,47	12,0	17,7	3,88	3,42	4,12	5,47	0,35	0,40	0,35	0,32

### 7.3.3.2. Frequenzsweepmessung

Aus der Abb. 7.35 ist zu entnehmen, dass der Level der Moduli in Abhängigkeit von Salzgehalt eindeutig progressiv ansteigt.

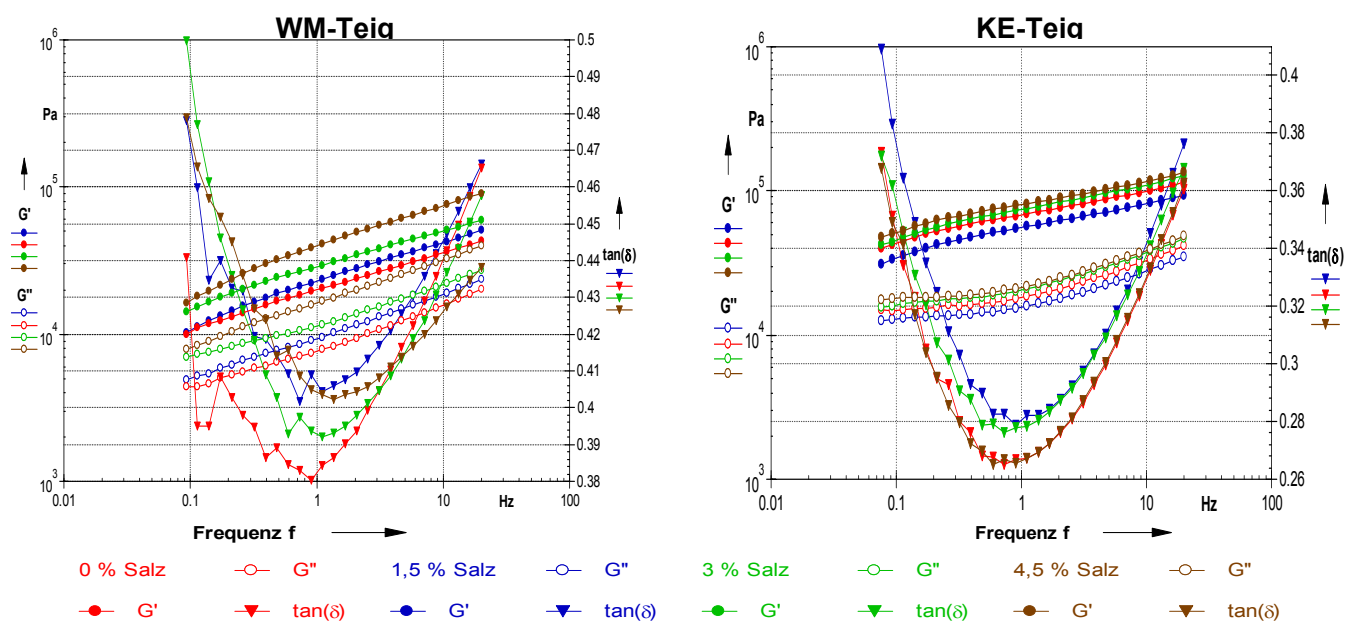


Abb. 7.35: Frequenzsweep Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen

Mit steigender Salzkonzentration im Teigsystem erhöhen sich deutlich die Werte der Moduli und liegen höheren Messkurvenlevels vor, was durch Veränderung der hydrophoben Interaktionen des Proteins und dessen Wasseraufnahmefähigkeit zu erklären ist [140, 141, 142]. Die Werte in der Tab. 7.34 verdeutlichen nochmals die Beobachtungen aus der Abb. 7.35.

Tab. 7.34: FS-Messung Vergleich WM- und KE-Teig bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen

Probe	Salzkonzentration %	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
		Koeffizient $G'_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\chi$	Koeffizient $G''_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\gamma$	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4\text{ Pa} \cdot \text{s}$	$ G^* $ $10^4\text{ Pa}$
WM	0	1,97	0,232	0,75	0,234	0,38	0,32	2,00
	1,5	2,23	0,228	0,90	0,221	0,40	0,44	2,35
	3	2,82	0,255	1,11	0,248	0,39	0,54	2,94
	4,5	3,81	0,266	1,53	0,254	0,40	0,75	3,88
KE	0	5,47	0,167	1,50	0,174	0,27	0,74	5,53
	1,5	6,77	0,162	1,88	0,179	0,28	0,92	6,82
	3	7,38	0,162	2,15	0,177	0,28	1,06	7,45
	4,5	7,97	0,160	2,18	0,178	0,27	1,08	8,03

Aus der Tab. 7.34 ist zu entnehmen, dass eine Salzzugabe positive rheologische Effekte bei Weizenmehlteig bewirkt. Dem gegenüber werden bei Kichererbsenmehl trotz höheren Proteingehalts am Beispiel der Strukturstabilität keine positiven Effekte nachgewiesen.

Offensichtlich führen Lösungsprozesse permanenter Dipole zu einer Strukturschwächung dieser Matrix, was am Beispiel des Exponenten  $\chi$  erkennbar ist. Ursache ist das kausal veränderte Proteinverhalten. In Abb. 7.36 werden die FS-Messungen von Mehlmischungen dargestellt.

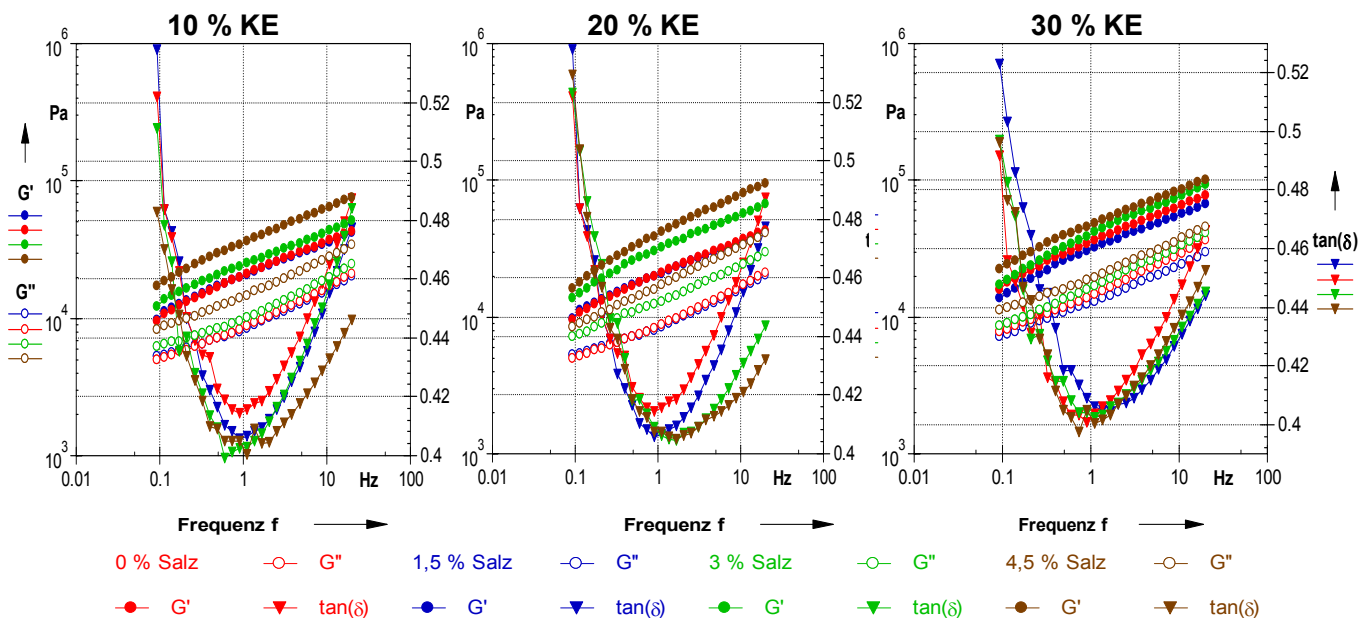


Abb. 7.36: Frequenzsweep Vergleich der Mischungen bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen

Analog wie beim WM-Teig sind bei den Mischungen mit höherer Salzkonzentration die Festkörpereigenschaften am stärksten ausgeprägt.

Tab. 7.35: FS-Messung Vergleich Mehlmischungen bei unterschiedlichen Salzkonzentrationen

Probe	Salzkonzentration %	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
		Koeffizient $G'_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\alpha$	Koeffizient $G''_{1\text{ Hz}}$ $10^4\text{ Pa}$	$\gamma$	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4\text{ Pa} \cdot \text{s}$	$ G^* $ $10^4\text{ Pa}$
10 % KE	0	1,99	0,236	0,83	0,231	0,42	0,41	2,10
	1,5	2,05	0,248	0,85	0,248	0,41	0,42	2,21
	3	2,41	0,233	1,00	0,236	0,41	0,50	2,56
	4,5	3,45	0,248	1,59	0,242	0,41	0,76	3,61
20 % KE	0	2,00	0,236	0,84	0,231	0,42	0,42	2,09
	1,5	2,05	0,248	0,85	0,248	0,41	0,43	2,25
	3	2,99	0,253	1,23	0,239	0,41	0,61	3,15
	4,5	3,88	0,268	1,60	0,251	0,41	0,80	3,96
30 % KE	0	2,99	0,243	1,23	0,239	0,40	0,61	3,15
	1,5	3,43	0,243	1,40	0,246	0,41	0,69	3,62
	3	3,87	0,264	1,58	0,254	0,41	0,79	3,97
	4,5	4,61	0,232	1,87	0,234	0,40	0,93	4,72

Anhand der Messdaten (Größe Exponent  $\alpha$ ) in der Tab. 7.27, 7.31 und 7.35 wurde nachgewiesen, dass die Messtemperatur und Salzkonzentration sowie Schüttwassermenge im optimalen Bereich die beste Strukturstabilität und Homogenität bzw. Verarbeitungsfähigkeit des Teigs aufweist. Durch diese Untersuchungen werden ebenfalls die Erfahrungswerte des Bäckers bestätigt. ( $T = 25\text{ °C}$ ,  $TA = 62\text{ %}$  und  $SK = 1,5\text{ %}$ ).

#### 7.4. Backeigenschaften

In den nachfolgenden Backuntersuchungen soll die Eignung der Mehlmischungen für die Herstellung eines kichererbsenangereicherten Brotes erfolgen.

##### 7.4.1. Backergebnisse der Versuchsmehle

Bei den Backversuchen wurde auf den Zusatz von Ascorbinsäure verzichtet, um ausschließlich die durch die Zumischungen des KE-Mehls hervorgerufenen Veränderungen unbeeinflusst von Chemikalien zu untersuchen. Durch die Zumischung des KE-Mehls erhöht sich die Wasseraufnahme und dadurch die Teigausbeute. Eine Abnahme des Gebäckvolumens bei den Mischungen wird festgestellt, was durch geschwächte Netzwerksausbildung des Klebers sowie geringere Gashaltung ( $\text{CO}_2$  entweicht) zu erklären ist. Beachtlich ist, dass die Brote aus den Mischungen einen geringeren Ausbackverlust aufweisen. Diese Erscheinung ist dadurch zu begründen, dass die Zumischungen mit KE-Mehl zur Verbesserung der Wasserbindungsfähigkeit durch erhöhten Protein- und Pentosangehalt führen.

Die Ergebnisse der Farinographuntersuchungen bestätigen die deutlich höhere Wasseraufnahme in den Mehlmischungen.

Tab. 7.36: Backergebnisse WM-Teig und deren Mischungen mit KE-Mehl

Probe		WM	KE 10 %	KE 20 %	KE 30 %
Parameter	Einheit				
Wassergehalt	%	13,7	12,9	12,6	12,5
Mehlmenge (14 % FA)	g	498,5	493,5	492,0	491,5
Wassermenge	%	<b>58,8</b>	<b>59,9</b>	<b>61,0</b>	<b>62,5</b>
Gesamtwasser	ml	294,0	299,5	305,0	312,5
Teigausbeute	g	<b>158,5</b>	<b>158,6</b>	<b>159,4</b>	<b>160,8</b>
Teigtemperatur	°C	26	26	26	26
Teiggewicht	g	<b>813,3</b>	<b>813,7</b>	<b>817,7</b>	<b>824,7</b>
Teigeinlage	g	406	406	403	399
Teigoberfläche	-	normal	noch normal	etwas feucht	ziemlich feucht
Teigelastizität	-	normal	noch normal	etwas klebrig	ziemlich klebrig
Gebäckgewicht	g	338,4	341,2	339,8	339,5
Gebäckausbeute	g	<b>135,8</b>	<b>138,3</b>	<b>138,1</b>	<b>138,1</b>
Ausbackverlust	%	<b>16,7</b>	<b>16,0</b>	<b>15,8</b>	<b>14,9</b>
Gebäckvolumen	cm <sup>3</sup>	1520	1380	1310	1090
Volumenausbeute	ml / 100 g	<b>610,0</b>	<b>559,0</b>	<b>532,5</b>	<b>443,5</b>
max. Höhe	mm	120	118	110	95
max. Breite	mm	120	115	115	111

In Abb. 7.37 ist die Teigeigenschaften (Teigelastizität und Teigoberfläche) nach dem Kneten für WM-Mehl im Vergleich zur deren Mischungen mit KE-Mehl dargestellt. Die Teigoberfläche des WM-Teigs und deren Mischung mit 10 % KE-Anteil waren in ihrer Beschaffenheit als „normal“ bis „noch normal“ einzustufen. Die Mischungen mit 20 % und 30 % KE-Mehl müssen als „etwas klebrig“ bis „klebrig“ bezeichnet werden.



Abb. 7.37: Teigeigenschaften Vergleich WM-Teig und deren Mischungen mit KE-Mehl

Der WM-Teig (Standard) und Teig aus der Mischung 10 % KE-Mehl waren nach Ablauf der Teigruhezeiten durch eine gute (weizentypische) Teigstabilität gekennzeichnet, so dass die Aufarbeitung kein Problem bereitete. Im Gegensatz hierzu zeigten die Teige mit Mischverhältnisse 20 % und 30 % KE-Mehl teilweise



nachlassende und fließende Eigenschaften, mit einer als feucht und klebrig zu beurteilenden Oberfläche. Hier sind insbesondere die Teige mit Fraktionen F1, F2 und F3 im Mischverhältnisse 20 % und 30 % hervorzuheben. Die Aufarbeitung war bezüglich des „Handlings“ nicht als praxisnah zu bezeichnen. Um eine genaue Beurteilung der Qualität bezüglich des Volumens und insbesondere der Krumenlockerung und der Porengleichmäßigkeit vornehmen zu können, wurde die einzelnen Krumen der Brote fotografiert. In Abb. 7.38 sind die Backeigenschaften der Brote aus WM-Mehl im Vergleich zu den Broten aus den Mischungen mit KE-Mehl dargestellt.



Abb. 7.38: Vergleich der Backeigenschaften WM-Mehl und Mischungen mit KE-Mehl

Aus der Abb. 7.38 ist zu sehen, dass sich die Volumina mit Erhöhung der KE-Mehle im Vergleich zum WM-Brot deutlich verringert. Festzustellen ist, dass sich die Porengleichmäßigkeit mit zunehmendem KE-Anteil verschlechtert und Höhlräume bei der Mischung mit 30 % aufweist.

Auffällig ist wie vorher erwähnt wurde, dass sich die Bräunungsintensität mit zunehmendem KE-Anteil in den Mischungen eindeutig erhöht. Interessant ist die Verbesserung der Bräunung der Brote, die bei Mischverhältnis 30 % KE deutlich war. Diese Erscheinung ist auf die erhöhte Konzentration an Proteine zurückzuführen, die die Maillard-Reaktion begünstigt. Die enthaltene Saccharide treten mit freien Aminosäuren in Wechselwirkung. Dabei findet beim Backprozess die nicht-enzymatische Bräunung (Maillard-Reaktion) in größerem Umfang statt. Die Frage, ob es während der Zerkleinerung in die Hammermühle zur Depolymerisierung von Proteinen des Mehls kommt (Mechanolyse?), sollte weiter untersucht werden. Die Eigenschaften der Backwaren sind durch die Zumischung von KE-Mehl in Höhe von 20 % (noch akzeptabel) und besonders 30 % verschlechtert worden. Es wurden deutliche

Veränderungen der Krumeneigenschaften wie Porung, Elastizität, Weichheit und Geschmack beobachtet siehe Tab. 7.37 und Abb. 7.38.

Tab. 7.37: Backergebnisse Beurteilungskriterien WM-Teig und deren Mischungen mit KE-Mehl

Probe	WM	KE 10 %	KE 20 %	KE 30 %
Parameter	Note : Art			
Gebäckausbund	gut: normal	noch gut: noch normal	befriedigend: ziem. geringere Lift	mangelhaft: geringere Lift
Bräunung	<b>normal</b>	<b>noch normal</b>	<b>kräftig</b>	<b>zu kräftig</b>
Krustenrösche	gut: normal	noch gut: noch normal	befriedigend: hartsplittig	mangelhaft: hart
Porengleichmäßigkeit	<b>gleichmäßig</b>	<b>ziemlich gleichmäßig (Verdichtung am Bodenbereich)</b>	<b>Ungleichmäßig (Verdichtung am Bodenbereich)</b>	<b>Höhlräume (Verdichtung am Bodenbereich)</b>
Krumenelastizität	gut: normal	noch gut: noch normal	befriedigend: ziem. geschwächt	mangelhaft: geschwächt
Geschmack	gut: einwandfrei	gut: einwandfrei	befriedigend: beeinträchtigt	mangelhaft: Fremdgeschmack
Geruch	gut: einwandfrei	befriedigend: beeinträchtigt	befriedigend: beeinträchtigt	mangelhaft: Fremdgeruch

Fazit: Eine Zumischung von KE-Mehl bis zu 20 % ist hinsichtlich der Backeigenschaften akzeptabel und stellt aus ernährungsphysiologischer Sicht eine gute Ergänzung dar.

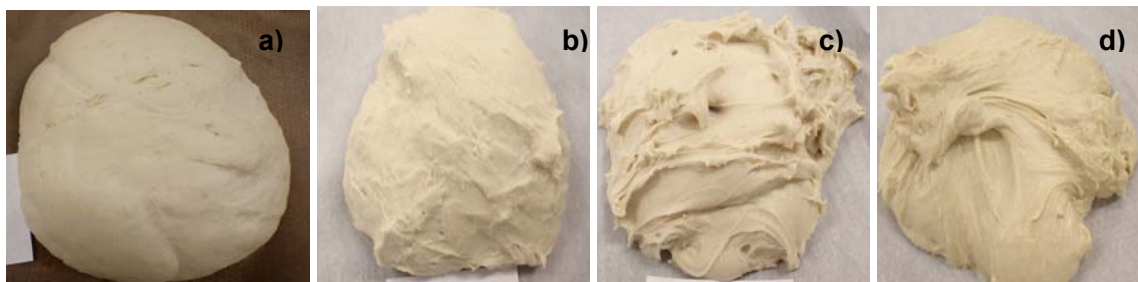


Abb. 7.39: Teigeigenschaften Vergleich WM-Teig und deren Mischungen mit Fraktion F1

- a) WM
- b) 10 % F1
- c) 20 % F1
- d) 30 % F1

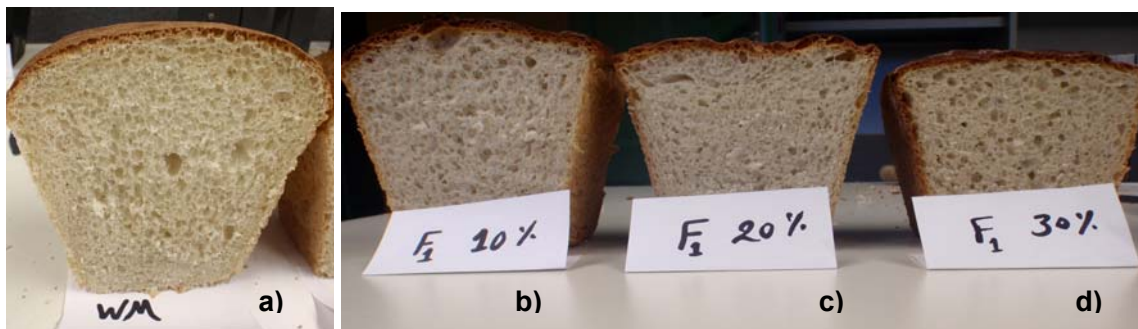


Abb. 7.40: Vergleich der Backeigenschaften WM und Mischungen mit Fraktion F1



Die aufgeführte Untersuchungsergebnisse in der Tab. 7.38 bestätigen, dass die Inkompatibilität des Partikelgrößespektrums von Weizenmehl und KE-Fractionen zu einer Verschlechterung der funktionellen Eigenschaften der Mehle, zur Abnahme der Gebäckvolumina sowie zu unakzeptablen Gebäckeigenschaften besonders beim Mischverhältnis von 30 % führen. In Tab. 7.38 sind die Backergebnisse enthalten.

Tab. 7.38: Backergebnisse WM-Teig und deren Mischungen mit KE-Fractionen

Probe		WM	F1			F2			F3		
Parameter	Einheit		10 %	20 %	30 %	10 %	20 %	30 %	10 %	20 %	30 %
Wassergehalt	%	13,7	12,5	11,8	11,4	12,4	11,5	11,3	12,5	11,4	11,3
Mehlmenge (14% F)	g	498,5	491,5	487,5	485,5	491,0	486,0	485,0	491,5	485,5	485,0
Wassermenge	%	<b>58,8</b>	<b>59,7</b>	<b>61,5</b>	<b>61,7</b>	<b>61,9</b>	<b>62,5</b>	<b>64,3</b>	<b>63,8</b>	<b>65,6</b>	<b>66,5</b>
Gesamtwasser	ml	294,0	298,5	307,5	308,5	309,5	312,5	321,5	319,0	328,0	332,5
Teigausbeute	g	<b>158,5</b>	<b>158,0</b>	<b>159,0</b>	<b>158,8</b>	<b>160,1</b>	<b>159,7</b>	<b>161,3</b>	<b>162,1</b>	<b>162,7</b>	<b>163,5</b>
Teigtemperatur	°C	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Teiggewicht	g	<b>813,3</b>	<b>812</b>	<b>816</b>	<b>815</b>	<b>822</b>	<b>820</b>	<b>827</b>	<b>831</b>	<b>834</b>	<b>838</b>
Teigeinlage	g	406	403	394	404	409	396	395	407	404	407
Gebäckgewicht	g	338,4	332,1	335,2	337,4	331,7	328,6	337,5	340,9	328,5	334,2
Gebäckausbeute	g	<b>135,8</b>	<b>135,1</b>	<b>137,5</b>	<b>138,9</b>	<b>135,1</b>	<b>135,2</b>	<b>139,2</b>	<b>138,7</b>	<b>135,4</b>	<b>137,8</b>
Ausbackverlust	%	<b>16,7</b>	<b>17,6</b>	<b>17,1</b>	<b>16,5</b>	<b>18,9</b>	<b>17,0</b>	<b>14,6</b>	<b>16,2</b>	<b>18,7</b>	<b>17,9</b>
Gebäckvolumen	cm <sup>3</sup>	1520	1500	1350	1180	1370	1150	1100	1150	1090	1080
Volumenausbeute	ml / 100 g	<b>610,0</b>	<b>610,4</b>	<b>553,9</b>	<b>486,1</b>	<b>558,8</b>	<b>473,3</b>	<b>453,6</b>	<b>467,8</b>	<b>449,1</b>	<b>445,4</b>
max. Höhe	mm	120	120	109	78	110	105	100	105	95	85
max. Bereite	mm	120	120	120	95	120	115	110	112	112	110
Teigoberfläche	-	normal	noch normal	feucht	feucht	noch normal	ziem. feucht	feucht	noch normal	ziem. feucht	feucht
Teigelastizität	-	normal	noch normal	klebrig	klebrig	noch normal	ziem. klebrig	klebrig	noch normal	ziem. klebrig	klebrig

Bei einem Zusatz der Fraktion F1 bleibt die Teigausbeute nahezu unverändert, während bei Zusatz der Fraktion F2 sowie Fraktion F3 sich die Teigausbeute von 158,5 g beim WM-Mehl auf über 160 g bei den Mischungen mit 20 % und über 162 g bei den Mischungen mit 30 % erhöht. Die Fraktion F1 weist im Vergleich zu den Fraktion F2 und Fraktion F3 deutlich bessere Backergebnisse bzw. Backeigenschaften auf. Diese Erscheinung ist dadurch zu begründen, dass die Partikelgrößenverteilung von Fraktion F1 im Vergleich zum WM-Mehl ähnlich ist.

Etwa 80 % der Mehlteilchen der Fraktion F1 besitzen eine Teilchengröße < 50 µm. Die maximale Teilchengröße liegt bei etwa 160 µm. Bei einem Zusatz der Fraktion F2 erhöht sich die Teigausbeute deutlich. Die Gebäckvolumina aber verringern sich von 610 ml beim WM-Brot auf 558 ml bzw. bis 453 ml bei den Mischverhältnisse 20 % und 30 % F3.

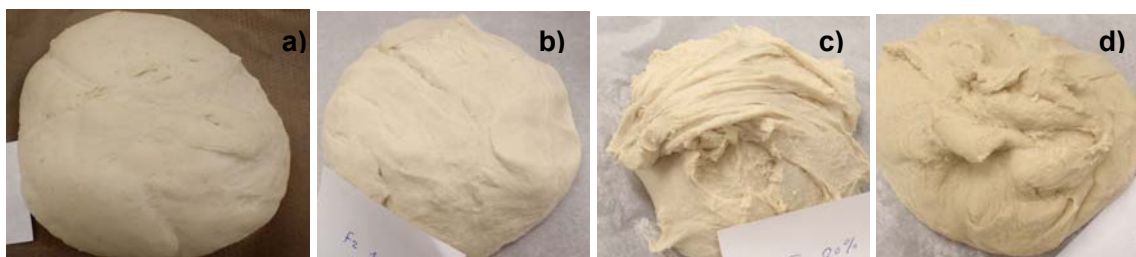


Abb. 7.41: Teigeigenschaften Vergleich WM-Teig und deren Mischungen mit Fraktion F2

- a) WM
- b) 10 % F2
- c) 20 % F2
- d) 30 % F2

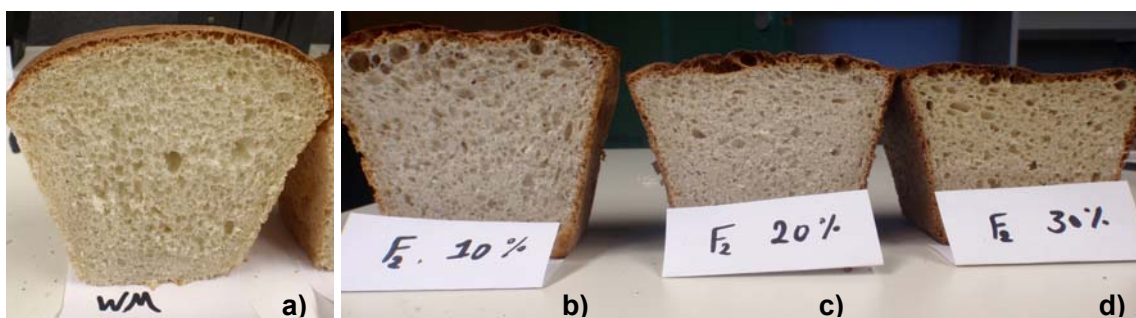


Abb. 7.42: Vergleich der Backeigenschaften WM-Mehl und Mischungen mit Fraktion F2

Die Ergebnisse der Backversuche für die Fraktion F3 zeigen das höchsten Wasseraufnahmevermögen und das höchste Backgewicht im Vergleich zum WM-Brot. Dagegen bewirkt das größere Partikelspektrum der Fraktion F3 und der Punktkontakt eine geringere spezifische Oberfläche und eine Verschlechterung des Backverhaltens. Die Netzbildung ist geschwächt wie das Gashaltvermögen des Teigs, was zur Verringerung des Brotvolumens führt. In Abb.7.43 sind die Eigenschaften des Teiges und der Backware dargestellt.

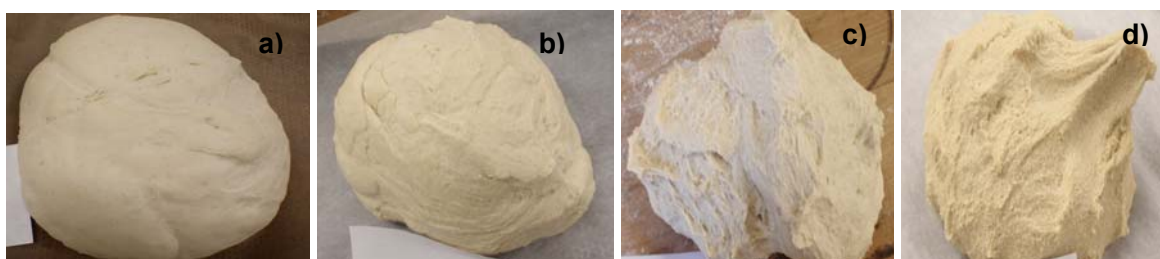


Abb. 7.43: Teigeigenschaften Vergleich WM-Teig und deren Mischungen mit Fraktion F3

- a) WM
- b) 10 % F3
- c) 20 % F3
- d) 30 % F3

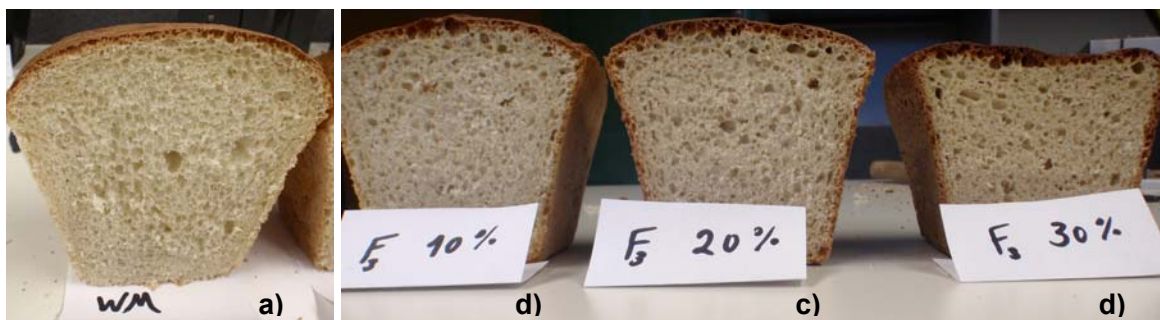


Abb. 7.44: Vergleich der Backeigenschaften WM-Mehl und Mischungen mit Fraktion F3

## 7.5. Kapitelzusammenfassung

Am Beispiel von Oszillationsmessungen im Modus Amplitudensweep, Frequenzsweep und Temperatursweep wurden Strukturuntersuchungen der Teige aus dem Kapitel.6 mit modernen Analyseverfahren fortgesetzt. Die erhaltenen physikalischen Größen am Beispiel des Speicher- und Verlustmoduls sind dabei objektiv und vergleichbar. Bereits die Amplitudensweeppmessung liefert den Nachweis, dass der LVB bei WM (0,6) im Vergleich zu KE (0,1) wesentlich größer ist. Dabei ist der mit Kichererbsen angereicherte Teig fester, aber spröder (bockig).

Ein Ranking für die Mischungen wird abgeleitet. Analoge Ergebnisse werden für die FS-Messungen als eigentliche Strukturanalyse gefunden.

Eine Numerisierung der Versuchsdaten wird durchgeführt. Die Schwächung der notwendigen viskoelastischen Relation wird am Beispiel des  $\tan \delta$  nachgewiesen. Für die Mischungen ergibt sich, dass der  $\tan \delta$  auf höherem Level infolge der erhöhten Wasseraufnahme vorliegt und damit die Teigformung vereinfacht wird. Dabei leidet jedoch die Teigstabilität am Beispiel der viskoelastischen Komponente.

Mit Hilfe von Temperatursweeppmessungen wird das Backverhalten simuliert.

Eine Masterkurve (Unikat) beschreibt die ablaufenden stofflichen Veränderungen bei der Erwärmung von 20 auf 90 °C. Nachgewiesen werden die Temperaturbereiche mit Erweichung, Proteindenaturierung und Stärkeverkleisterung. Eine Beschreibung der funktionellen Eigenschaften von Protein und Stärke findet zugeordnet statt.

Es wurde nachgewiesen, dass die Messtemperatur und Salzkonzentration sowie Schüttwassermenge im optimalen Bereich die beste Strukturstabilität und Homogenität bzw. Verarbeitungsfähigkeit des Teigs aufweist. Durch diese Untersuchungen werden ebenfalls die Erfahrungswerte des Bäckers bestätigt.

( $T = 25\text{ °C}$ ,  $TA = 62\%$  und  $SK = 1,5\%$ ).

Erneut werden erhebliche Unterschiede zwischen den Backeigenschaften von WM- und KE-Teig gefunden. Die Messungen der Backeigenschaften der Mehlmischungen weisen erneut die singuläre Stellung des reinen KE-Teigs nach. Die Kichererbsenfraktionen liegen dabei mit dem WM-Teig in einem engen Ereignisfeld, siehe beispielsweise Abb. 7.13, 7.17.

Nachgestellte Kriechversuche liefern am Beispiel des Gesamtschubmoduls  $G_0$  und der Ruhescherviskosität  $\eta_0$  analoge Aussagen wie die Oszillationsmessungen, basieren aber lediglich auf „Einpunktuntersuchungen“.

Eine umfangreiche Bewertung der Backeigenschaften beendet das Kapitel und sichert die Anwendung bekannter Kriterien der DLG zur Bewertung von Gebäcken. Der Back- und Verzehrttest bestätigt eine kritische Kichererbsenmehlkonzentration im Weizenbrotteig von  $> 20\%$ .

## 8. Teigheologische Eigenschaften vom Maismehlen

Ziel der nachstehenden Untersuchungen ist der Nachweis von Veränderungen der Teigeigenschaften vom gentechnisch veränderten Mais durch moderne rheologische Messverfahren. Dazu werden die übergebenen Maisproben (**A188 x H99, B x A, AD x B, EAD 50-5 und C x A**) aufbereitet und im Vergleich mit Standardweizenmehl der Type 405 und Standardmais untersucht und verglichen. Zur Anwendung kommen Oszillationsmessungen mit Luftlagertechnik zur Strukturuntersuchung und Kriechversuche. Sämtliche Untersuchungen mit Ausnahme des Temperatursweeps werden bei 25 °C durchgeführt. Die Maisvermahlung der Standardprobe erfolgte im Mühlentechnikum mittels Versuchswalzenstuhl. Folgende Modalitäten wurden eingehalten: (Trockenentkeimungsvermahlung mittels Walzenstuhl, Grießvermahlung nach dem Schälen, 12-stufige Vermahlung mittels Riffelwalzen auf Durchgang <250 µm). Die Maiszerkleinerung  $\geq 1000$  µm bereitete keine Probleme.

Der Keimling war vom Mahlgut entfernt. Unterhalb 1000 µm war im Gegensatz zur Weizenvermahlung ein beträchtlicher Aufwand notwendig. Der Mahlprozess wurde für die weiteren geplanten Untersuchungen reproduzierbar gestaltet. Folgende Ausbeuterelationen wurden gefunden: (Mehl: 66 %, Kleie: 34 % und Standardwerte: 60 %). Die Vermahlung der übergebenen Maisproben erfolgte, da Minimengen vorlagen, mit Hilfe des Mühlentyps QUADROMAT (4-Walzensystem,) ebenfalls auf ein Partikelsystem < 250 µm, um eine relative Vergleichbarkeit zu sichern.

### 8.1. Farinographuntersuchung

Mit dem vorhandenen Maismehl wurden Einteig- und Teiguntersuchungen mit empirischen Messmethoden am Beispiel der Farinographmessungen durchgeführt. Die Abbildung. 8.1 zeigt die Messmitschrift der Farinographuntersuchung für Maismehl-Standard.

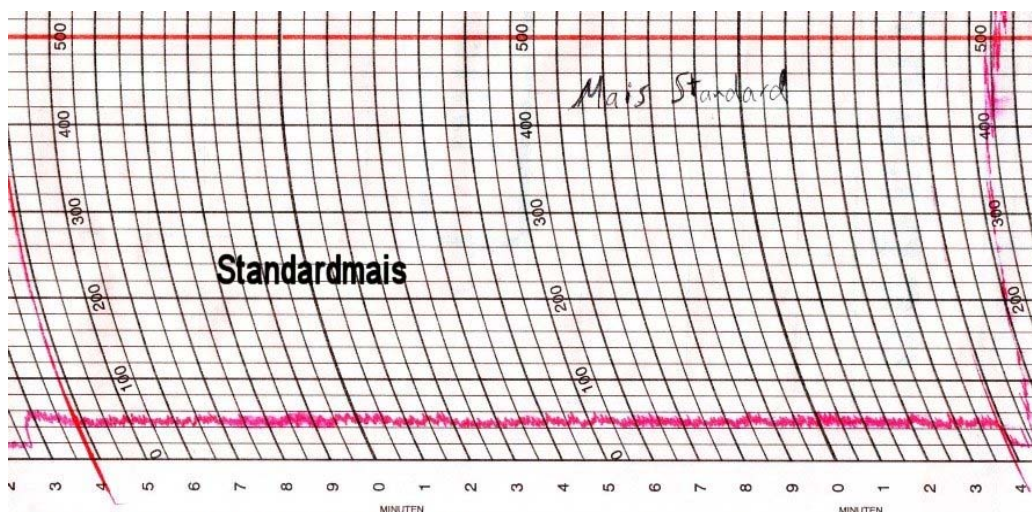


Abb. 8.1: Farinographuntersuchung Maismehl-Standard



In Abb. 8.2 ist exemplarisch für Maisprobe **A188 x H99** der Farinographammverlauf dargestellt.

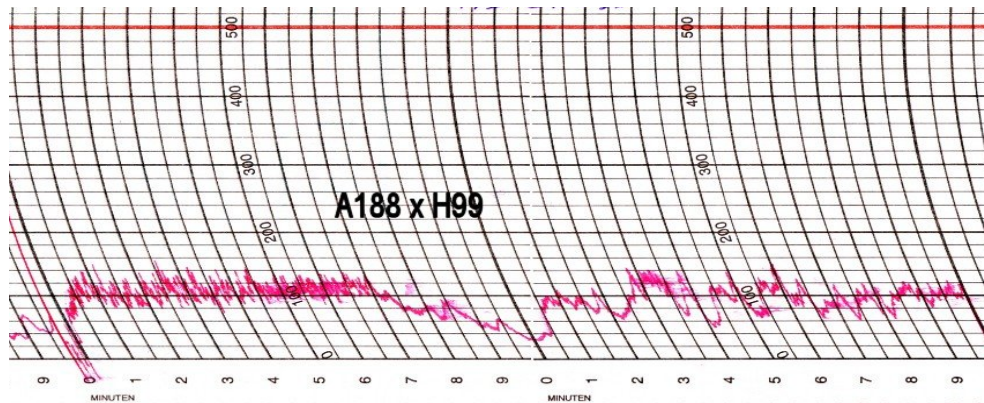


Abb. 8.2: Farinographuntersuchung Probe A188 x H99

Im Vergleich zum Maismehl-Standard liegt das Drehmoment bei der Probe **A188 x H99** auf doppeltem Level (ca. 100 FE statt ca. 50 FE) vor. Eine Teigstabilität ist nicht gegeben; siehe Abriss nach 7 min durch mechanische Überarbeitung. In Abb. 8.3 ist exemplarisch für die eingesetzte Maisprobe **B x A** der Farinographammverlauf dargestellt.

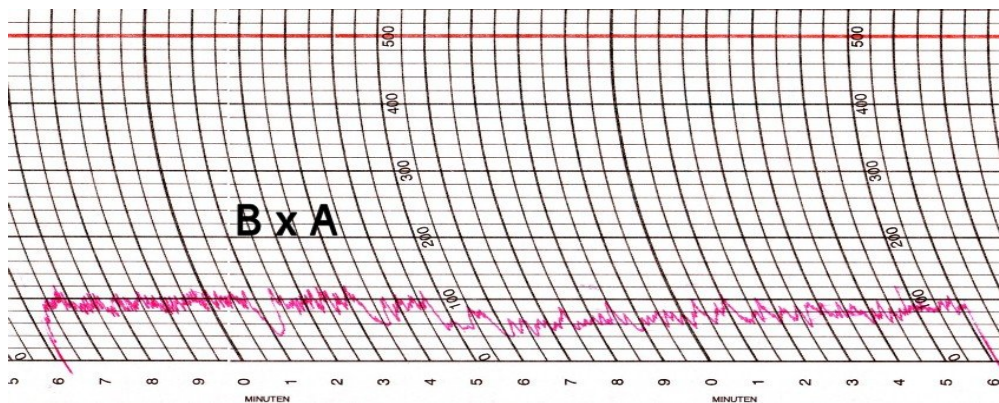


Abb. 8.3: Farinographuntersuchung Maismehl Probe B x A

Ein Level von 100 FE wird erreicht. Der Teig zeigt sich bearbeitungsstabiler und stetig elastisch; ein leichter Abfall findet nach ca. 12 min statt. Die Ergebnisse der Farinographsuntersuchung für Maisprobe **AD x B** werden in der Abb. 8.4 dargestellt.

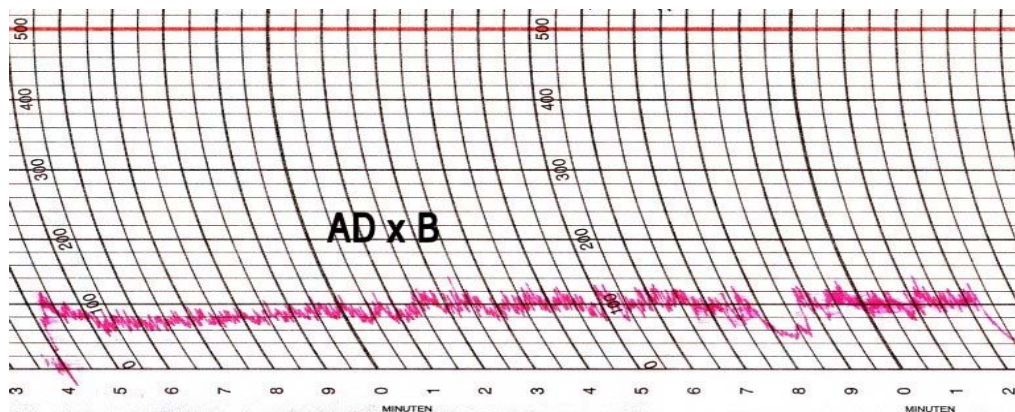


Abb. 8.4: Farinographuntersuchung Maismehl Probe AD X B

Eine Teigerweichung in der 2. Minute wird festgestellt. Der Level liegt stabil über die Zeit bei 100 FE. In Abb. 8.5 ist exemplarisch für Maisprobe **EAD 50-5** der Farinographammverlauf dargestellt.

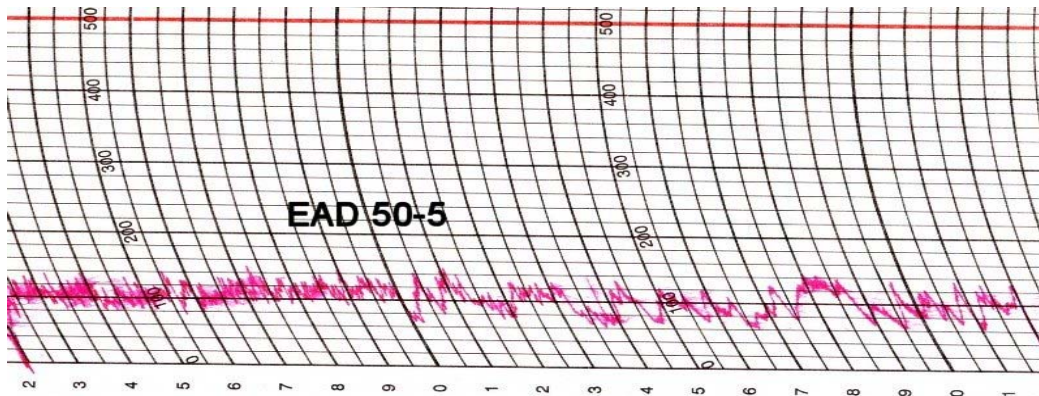


Abb. 8.5: Farinographuntersuchung Maismehl Probe EAD 50-5

Eine breite instabile Spur wird durch den Farinographen aufgezeichnet. Der Level liegt bei 100 FE. Die Ergebnisse der Farinographsuntersuchung für Maisprobe **AD x B** werden in der Abb. 8.6 dargestellt.

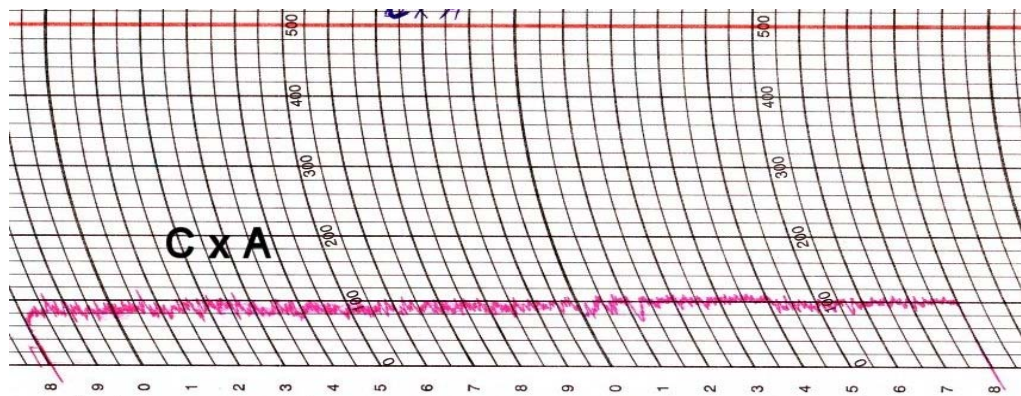


Abb. 8.6: Farinographuntersuchung Maismehl Probe C x A

Der Level nach Einteigung liegt bei ca. 80 FE. Durch die mechanische Agitation liegen am Ende des Versuches 100 FE vor. Die Elastizität des Teiges ist dabei völlig verloren gegangen. In Abb. 8.7 ist exemplarisch für das eingesetzte WM-Mehl der Farinographammverlauf dargestellt.

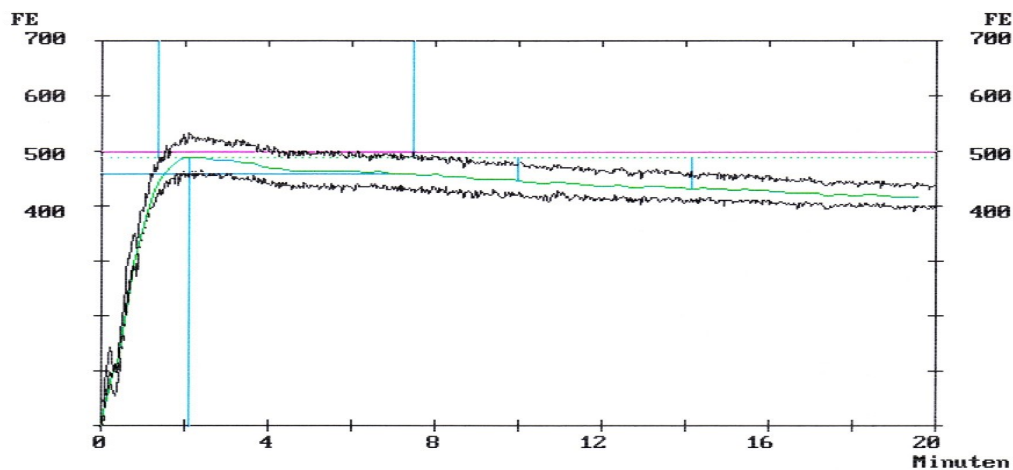


Abb. 8.7: Farinographuntersuchung Weizenmehl Type 405



Die Doppelbestimmung für Weizenmehl Type 405 liefert die bekannten Relationen bei Farinograph-Untersuchungen. So hat das Weizenmehl nach der ICC-Methode 59,8 % des Wassers aufgenommen (korrigiert auf 500 FE) bzw. 59,1 % korrigiert auf 14,0 % und besitzt eine Teigentwicklungszeit von 2,1 min, eine Stabilität von 6,1 min und Erweichung von 44 FE (10 min nach Beginn). Einen leichten Abfall der Teigkonsistenz mit 491 FE wurde beim Weizenteig registriert.

## 8.2. Ozillationsmessungen

### 8.2.1. Amplitudensweepmessungen

Das Einteigen für die Probenherstellung der fundamentalen Untersuchungen erfolgte mittels Teigknetter (Knethaken) eines handelsüblichen Handrührgerätes unter standardisierten Bedingungen. Die Teigausbeute wurde dabei variiert mit TA 90 %, 100 %, 110 %. Im weiteren Berichtsverlauf werden ausschließlich Ergebnisse mit einer Teigausbeute TA 100 % dargestellt.

In Abb. 8.8 erfolgen eine Zusammenstellung von Speicher- und Verlustmodul sowie der Verlustfaktor der fünf Mais-Teigpräparationen im Vergleich zum Weizen- und Mais-Standardteig

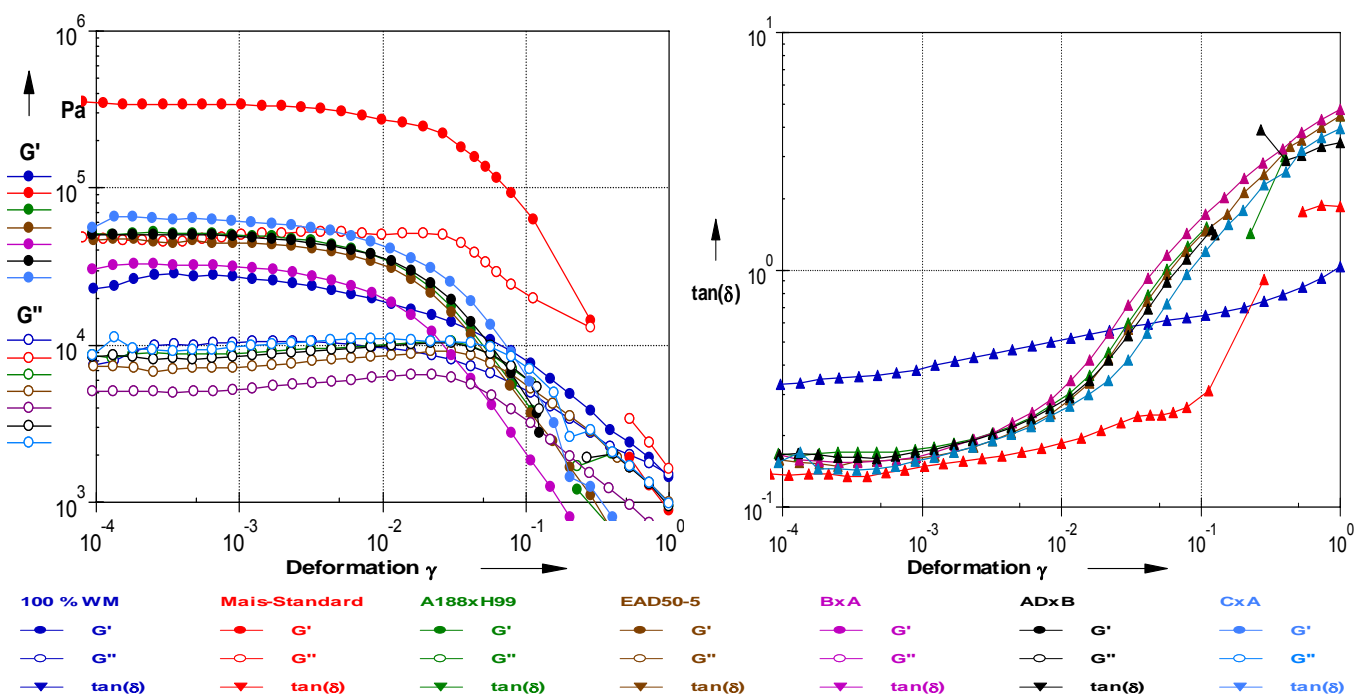


Abb. 8.8: Amplitudensweep Vergleich sämtlicher Präparate mit WM- und Mais-Standard

Im Vergleich zum Weizenmehl der Type 405 liegen die Moduli beim Maismehl-Standard um eine Zehnerpotenz höher und belegen eine geringere Viskoelastizität dieses Teiges. Er stellt sich vergleichsweise unstrukturiert/inhomogen dar. Für die Durchführung des Frequenzsweeps erfolgt die Festlegung der Grenze des linear viskoelastischen Bereiches LVE mit  $\gamma = 10^{-3}$ . Ein ausgeprägter LBV mit dominantem Festkörperverhalten ( $G' > G''$  bzw. Verlustfaktor  $< 1$ ) für alle Teige ist zu erkennen, gefolgt von einem Abfall beider Moduli und einem Anstieg des Verlustfaktors mit Strukturumbruch ( $\tan \delta = 1$ ).

Die um eine Dekade höhere Festigkeit/Steifigkeit beim Maisteig resultiert im Wesentlichen aus den vorliegenden unvernetzten Stärkepartikeln, die als Dispersion mit Punktkontakt vorliegen und kein Netzwerk bilden. Die Wasseraufnahme ist abgeschlossen und das Wasser hauptsächlich in das Korninnere transportiert, so dass keine viskoelastischen Eigenschaften sondern ein mehr sprödes Verhalten vorliegt. Ab einer bestimmten Deformation zerbricht das Netzwerk, was beim Weizenmehl nicht der Fall ist, da hier bekannte viskoelastische Eigenschaften voll ausgeprägt sind. Der  $\tan \delta$  des Weizenteiges liegt signifikant über dem Maisteig und bestätigt die gemachten Aussagen. Die bewirkten Unterschiede bezüglich des Materialverhaltens im Amplitudensweep sind sehr gut zu erkennen. Am Beispiel des Speichermoduls bewirken die Veränderungen die Nähe zum Weizenverhalten. Es ergibt sich folgendes Ranking für  $\gamma = 10^{-3}$

$$\text{Weizen} < \mathbf{B \times A} < \text{EAD 50-5} < \text{AD x A} < \text{A188 x H99} < \text{C x A} < \text{Mais Standard in enger Spur}$$

Erkennbar ist, dass die beiden Weizenmodule für  $G'$  und  $G''$  die obere und die untere Basiskurve für das elastische und viskose Verhalten bilden. Am Beispiel des Verlustmoduls lautet das Ranking für  $\gamma = 10^{-2}$ :

$$\text{Weizen} > \mathbf{B \times A} > \text{A 188 x H99} > \text{AD x B} = \text{ESD 50-5} > \text{C x A} > \text{Mais-Standard}$$

Das bedeutet, dass die Präparation **B x A** aus materialwissenschaftlicher Sicht als am Weizen ähnlichsten einzuschätzen ist. Liegen am Beispiel des Speichermoduls diese in der Nähe des Weizenteiges, zeigt der Verlauf des im doppelt-logarithmischen Funktionspapier mehr eine stärkere Dominanz des Maismehl-Standard-Einflusses. Am Beispiel der viskoelastischen Relation, die der  $\tan \delta$  als Quotient  $G'' / G'$  darstellt ergibt sich folgendes Ranking für  $\gamma = 0,01$ , welches auch für das Deformationsband gültig ist:

$$\text{Weizen} > \mathbf{B \times A} > \text{A 188 x H99} > \text{AD x B} = \text{ESD 50-5} > \text{C x A} > \text{Mais-Standard}$$

Mit zunehmender Deformation werden auch hier die bewirkten Unterschiede im Vergleich zur Messkurve Mais Standard deutlich zugunsten der viskoelastischen Eigenschaften verschoben, die aber nicht mit denen des Weizens identisch sind, sondern eine eigenständige Versuchsklasse bilden und als frühzeitiger mechanisch instabil bewertet werden müssen.

Es muss bei der Maisprobe **AD x B** eingeschätzt werden, dass bereits am Beispiel der AS-Messung und des erkennbaren nicht mehr so homogen und stetigen Verlaufs ein viskoelastisches Verhalten nachgewiesen werden kann, welches nicht auf dem Level des vorhergehenden Präparates liegt. Siehe „Zacken“ bei kleineren Deformationen. Aus rheologischer Sicht des Amplitudensweeps ist die Präparation BxA dem Weizen am nahestehendsten. Für dieses Präparat werden also die besten Annäherungen der viskoelastischen Materialeigenschaften infolge Veränderungen an den Weizen gefunden. Aus der Abb. 8.8 dargestellten, deformationsabhängigen Speicher- und Verlustmodulkurven wurden die Werte der Tab. 8.1 ermittelt. Dabei wurden Moduli und Verlustfaktor sowie komplexe Viskosität und komplexe Schubmodul bei  $\gamma = 10^{-3}$  aufgelistet.



Tab. 8.1: Amplitudensweep Vergleich sämtlicher Präparate mit WM- und Mais-Standard

Deformation	Probe	$G'$ $10^4$ Pa	$G''$ $10^4$ Pa	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4$ Pa · s	$ G^* $ $10^4$ Pa
$\gamma = 10^{-3}$	100 % WM	3,18	1,07	0,34	0,53	3,35
	B x A	3,11	0,53	0,17	0,50	3,15
	EAD 50-5	4,44	0,73	0,16	0,72	4,50
	AD x B	4,89	0,86	0,18	0,79	4,96
	A188 x H99	4,99	0,89	0,18	0,81	5,07
	C x A	6,10	0,99	0,16	0,98	6,18
	Mais-Standard	33,8	5,00	0,15	5,44	34,2

## 8.2.2. Frequenzsweepmessungen

Nachstehend wird der native Strukturierungszustand des Teigs mittels Frequenzsweep erfolgt. In Abb. 8.9 ist zunächst ein Vergleich von Speichermodul, Verlustmodul und Verlustfaktor über das Frequenzband für Maisproben im Vergleich zum WM- und Mais-Standard dargestellt.

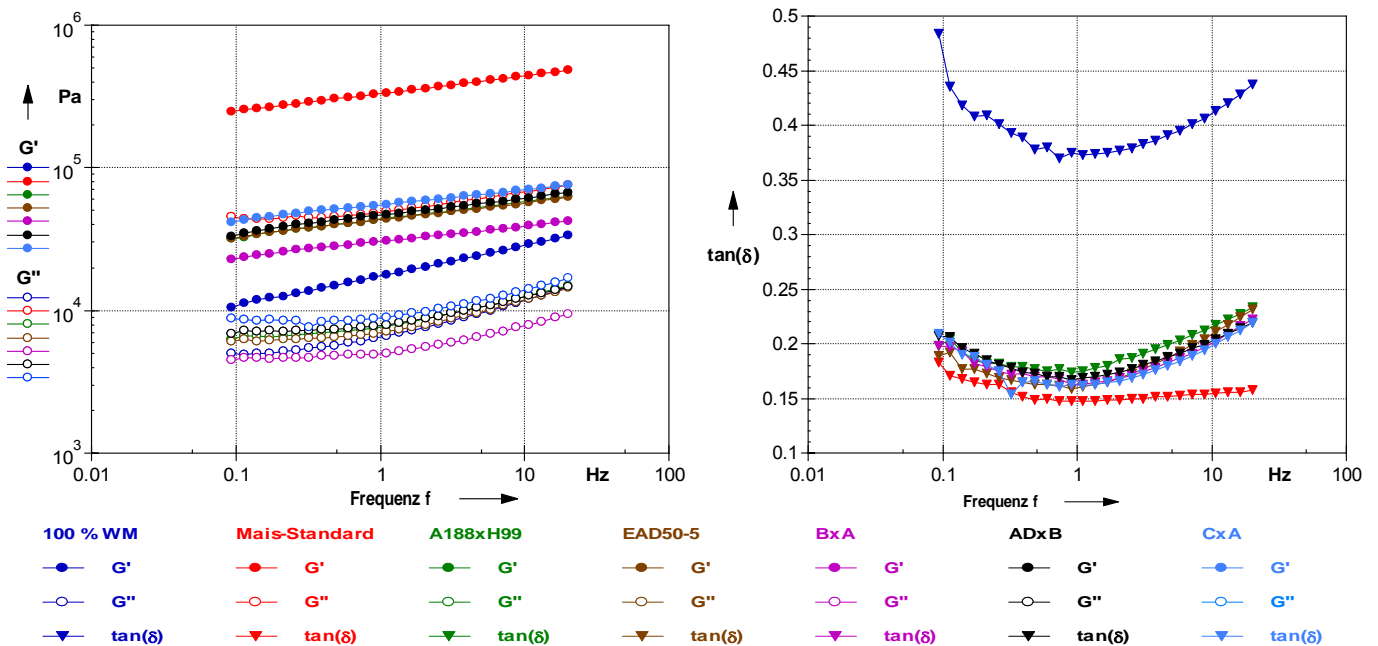


Abb. 8.9: Frequenzsweep Vergleich der Mais-Präparate mit WM- und Mais-Standard

Durch den parallelen Verlauf des  $G''$  /  $G'$ -Verlaufs über die Messfrequenz wird die für einen Teig bekannte Dispersionsstruktur nachgewiesen. Von Auswertungsinteresse ist der Vergleich von Levels für die genannten Moduli ( $G''$  und  $G'$ ), insbesondere des Verlaufs des Verlustfaktors. Eindeutig liegt am Beispiel der Dispersionsstruktur der Level des Verlustfaktors von Weizen auf ca. 0,35 (bekannte viskoelastische Relation) im Vergleich zum Mais mit 0,15 (wenig viskoelastisch, fester, steif und spröde) als Materialeigenschaften. Die bekannten Eigenschaften von Maismehl werden bestätigt. Die ausgeprägten viskoelastischen Eigenschaften der Kleberproteinmatrix werden nicht vorgefunden. Vor der Verkleisterung bestimmen Punktkontakte der Stärkepartikel im Wesentlichen die strukturellen Eigenschaften.

Die Messdaten stehen als Vergleichsdaten für die nachstehend untersuchten Maispräparate zur Verfügung. In einem Vergleich des Speichermodullevels ergibt sich folgendes Ranking für  $f = 1 \text{ Hz}$ :

$$\text{Weizen} < \mathbf{B \times A} < \text{EAD 50-5} < \text{A 188 x H99} < \text{AD x B} < \text{C x A} < \text{Mais-Standard}$$

mit beachtlichem Abstand zum Mais Standard und einer der bewirkten Präparate mit Nähe zum Weizen. Zu beachten ist der (relativ) hohe Wert des Verlustfaktors als Indikator **viskoelastischen** Verhaltens und Charakteristik eines Weizenmehlteiges. Die Beobachtungen aus der Abb. 8.9 ergeben die gleichen Aussagen wie zum Amplitudensweep. Liegen die Speichermodule der Präparate in der Phalanx des Weizens, sind die viskoelastischen Eigenschaften in der Nähe des Mais Standard angeordnet. Offensichtlich bereitet die Zuordnung / Bereitstellung der viskosen Komponente (Gliadin !!) Probleme. Der Level des Verlustfaktors der Präparationen liegt in der Nähe der Messkurve Mais Standard. Die Maisprobe **B x A** zeigt die besten Annäherungen anhand des Speichermodulverlaufs an den Weizen. Für die Maisprobe **A188 x H99** wird gezeigt, dass das Frequenzband dieser Probe unterhalb des Standardmaises liegt und es werden bereits erste Unterschiede zum Standardmais am Beispiel der durchgeführten Untersuchungen sichtbar sind. Dabei stellt sich heraus, dass am Beispiel der berechneten Exponenten  $x$  und  $y$  die Maisprobe **A188xH99** zu favorisieren wäre. Für Maispräparat **AD x B** wird im Vergleich zum Standardmais ein mehr viskoelastisches Verhalten nachgewiesen. Für Maisprobe **C x A** am Beispiel des  $\tan \delta$  mit Schwellenwert 0,21 und geringeren Werten über das Frequenzband kann von nur geringen viskoelastischen Eigenschaften ausgegangen werden, und weist ein ähnliche Ergebnisse für die veränderten Präparationen jedoch nicht die Qualität der Veränderungen von **B x A** auf. Bisher zeichnet sich die Maisprobe **EAD 50-5** als die schwächste Präparation bezüglich der Nähe zu dem Weizeneigenschaften aus. Für alle Teigpräparationen wurden die charakteristischen Parameter des Frequenzsweepes, wie der Koeffizient und Exponent der exponentiellen Regressionsgleichung und der Verlustfaktor bei einer Frequenz von 1 Hz in Tab. 8.2 aufgelistet. Die Werte in der Tab. 8.2 formalisieren die Daten aus der Abb. 8.9 und verdeutlichen noch mal diese Aussagen.

Tab. 8.2: Frequenzsweep Vergleich der Teigpräparationen sowie WM- und Mais-Standard

Probe	Dynamische Kennwerte (Moduli)						
	Koeffizient $G'_{1 \text{ Hz}}$ $10^4 \text{ Pa}$	$x$	Koeffizient $G''_{1 \text{ Hz}}$ $10^4 \text{ Pa}$	$y$	$\tan \delta$	$ \eta^* $ $10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$ G^* $ $10^4 \text{ Pa}$
<b>WM</b>	1,75	<b>0,211</b>	0,65	<b>0,208</b>	0,37	0,27	1,89
<b>B x A</b>	3,04	<b>0,110</b>	0,49	<b>0,132</b>	0,16	0,45	3,12
<b>EAD 50-5</b>	4,33	<b>0,119</b>	0,69	<b>0,161</b>	0,16	0,64	4,46
<b>A188 x H99</b>	4,35	<b>0,124</b>	0,78	<b>0,159</b>	0,18	0,65	4,50
<b>AD x B</b>	4,64	<b>0,123</b>	0,81	<b>0,140</b>	0,17	0,69	4,78
<b>C x A</b>	5,50	<b>0,107</b>	0,80	<b>0,127</b>	0,16	0,81	5,64
<b>Mais-Standard</b>	33,2	<b>0,123</b>	4,93	<b>0,107</b>	0,15	4,86	33,9

### 8.2.3. Temperatursweepmessungen

Bei konstanter Amplitude  $\gamma = 10^{-3}$  und Frequenz  $f = 1$  Hz sowie bei vorgegebener Temperaturerhöhung von 1 K/min werden Speicher- und Verlustmodul sowie der Verlauf des  $\tan \delta$  in Abhängigkeit von der Temperatur erfasst. Diese Heizrate wird gewählt, um Gradientenfreiheit in der Probe zu sichern und stattfindende Prozesse deutlich detektieren zu können.

In Abb. 8.10 sind am Beispiel des Speicher- und Verlustmoduls sowie des Verlustfaktors die temperaturabhängigen Verläufe von Mais-Standard dargestellt.

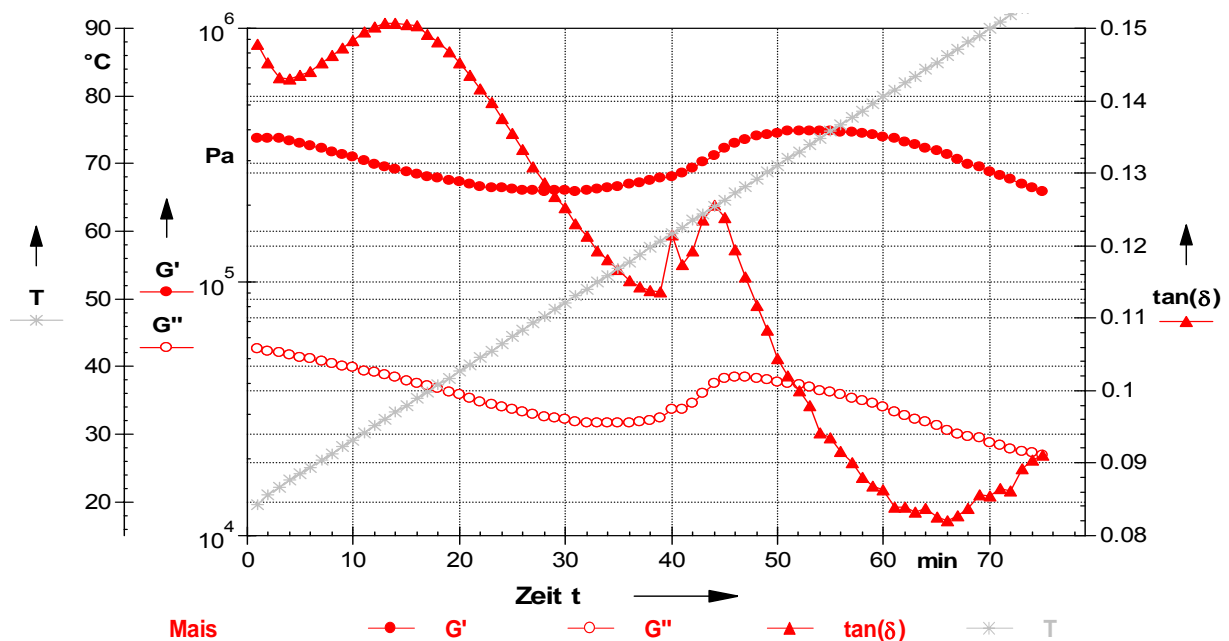


Abb. 8.10: Mais-Standard Simulation der Backeigenschaften

Durch die Erwärmung werden Speicher- und Verlustmodul von Anfangstemperatur bis ca. 50 °C infolge Temperaturerhöhung reduziert. Der  $\tan \delta$  zeigt bei 35 °C ein absolutes Maximum und indiziert die geringste Strukturstabilität im Erwärmungsprozess. Als Ursache sind schwächste Interaktionen des Wassers mit den Proteinen und besonders mit der Stärke in der Gesamtmatrix anzusehen. Danach wird die Wasseraktivität im Temperaturbereich von 35 bis 57 °C stetig verringert und indiziert verstärkte Zuordnung des Wassers zum Protein bzw. wieder zur Stärke. Mit der beginnenden Denaturierung der Maisproteine ab 57 °C wird Wasser freigesetzt bis in den Temperaturbereich von 64 °C, gekennzeichnet durch die Ausbildung eines relativen Maximums des  $\tan \delta$ .

Danach wird das freigesetzte Wasser des Proteins von der Stärke für die beginnende Verkleisterung aufgenommen und immobilisiert. Ein absolutes Minimum des  $\tan \delta$  wird bei 85 °C gefunden und kennzeichnet die mögliche Wasserimmobilisierung des beim Einteigen zugeführten Wassers nun in Bindung an die verkleisterte Stärke. Unter Punkt 7.1.3 wurde die Simulation der Backeigenschaften von WM durch Temperatursweep ausführlich beschrieben und diskutiert.

Durch den Temperatursweep sollen die Backeigenschaften von Weizenteig, Mais Standard und den Präparationen vergleichsweise simuliert werden.

In Abb. 8.11 sind am Beispiel des Speicher- und Verlustmoduls sowie Verlustfaktor die temperaturabhängigen Verläufe dargestellt.

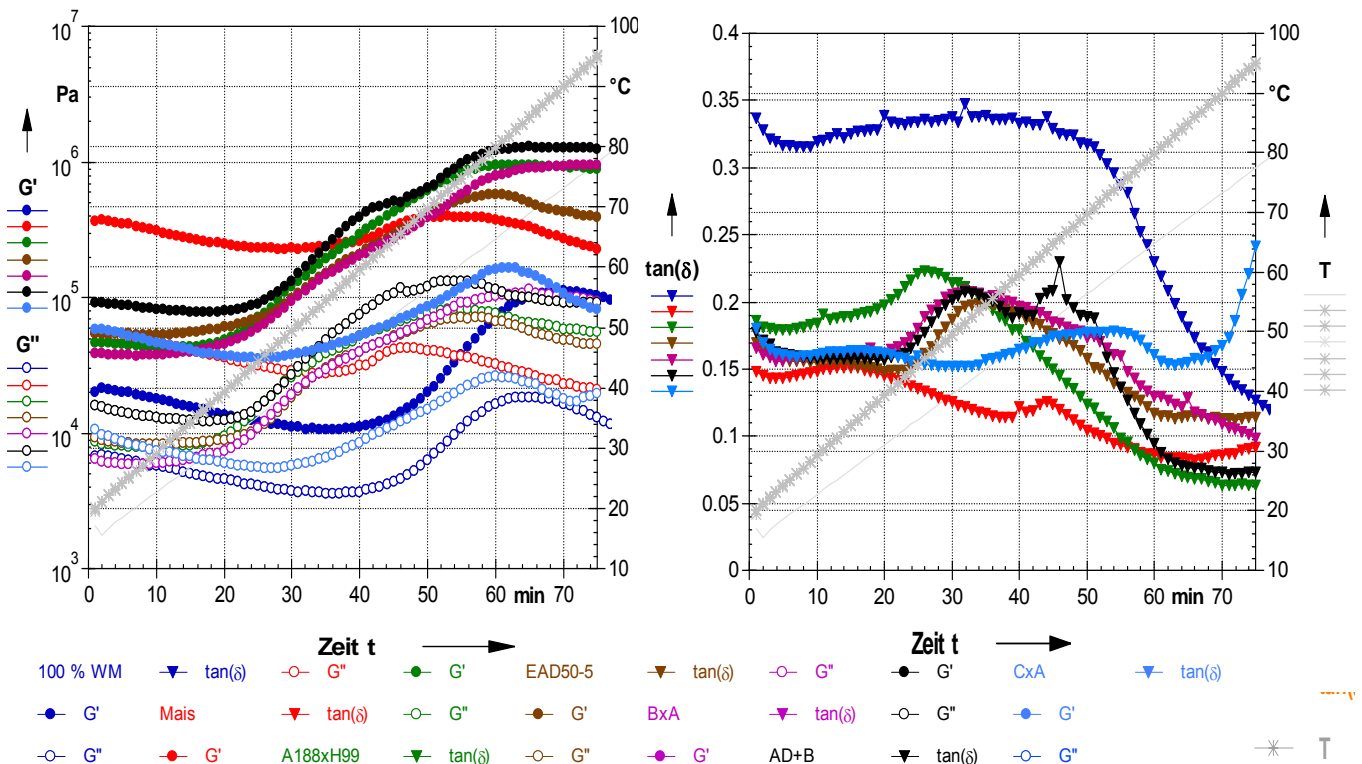


Abb. 8.11: Simulation der Backeigenschaften Maispräparationen im Vergleich zum Mais und WM-Teig

In den Messverläufen stellt Weizen eine Singularität dar. Prozesse der Proteindenaturierung werden unmittelbar ermittelt. Ab 50 °C stellen sich im doppelt logarithmischen Funktionspapier konstante Relationen ein. Ein Anstieg auf ein ähnliches Level, nur wesentlich verspätet zeigen AD x B, A188 x H99, B x A und abgeschwächt EAD 50-5. Unterhalb des Speichermoduls Mais Standard liegt die Messkurve  $G'$  von C x A. Am Beispiel des  $G''$ -Verlaufes kann erkannt werden, dass bis auf die Präparation C x A diese über der Messkurve Mais Standard liegen.

Die Präparation B x A zeigt hier am Ende des Temperaturbereiches den höchsten Level. Das Gros der Messverläufe ähnelt der  $G''$ -kurve WM-Mehl und bestätigt die durchgeführten Veränderungen. Die Messkurve Mais Standard bildet die untere Grenzkurve für den Messverlauf der Präparationen. Eine eigene Klasse bilden die Präparationen ab. Extrem aus dem Ereignisfeld fallen C x A und A188 x H99 heraus. Es wird vorgeschlagen, die Backeigenschaften mit konventionellen Methoden zu testen, um sichere Aussagen am Beispiel von Porung, Dichte, Farbe usw. treffen zu können. Die Werte in der Tab. 8.3 formalisieren die Daten aus der Abb. 8.11

Tab. 8.3: Temperatursweep Vergleich der Teigpräparationen sowie WM- und Mais-Standard

Probe	Dynamische Kennwerte		Temperatur °C							
			20	30	40	50	60	70	80	90
100 % WM	G'	10 <sup>4</sup> Pa	1,98	1,40	1,10	1,17	3,29	10,5	9,17	5,44
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	0,62	0,50	0,37	0,39	0,97	1,81	1,07	0,48
	tan δ		0,32	0,33	0,33	0,33	0,30	0,17	0,12	0,09
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	2,07	1,47	1,16	1,23	3,43	10,6	9,23	5,46
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,33	0,23	0,18	0,19	0,55	1,69	1,47	0,87
B x A	G'	10 <sup>4</sup> Pa	3,85	4,07	4,72	10,3	21,4	38,9	79,5	93,4
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	0,64	0,66	0,77	2,14	4,18	6,74	10,3	10,1
	tan δ		0,17	0,16	0,16	0,21	0,20	0,17	0,13	0,11
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	3,90	4,13	4,78	10,6	21,8	39,4	80,1	93,9
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,62	0,66	0,76	1,68	3,47	6,28	12,8	15,0
EAD 50-5	G'	10 <sup>4</sup> Pa	5,42	5,59	6,14	10,7	22,7	39,9	57,4	43,5
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	0,92	0,85	0,91	2,06	4,25	6,28	6,70	4,88
	tan δ		0,17	0,15	0,15	0,19	0,19	0,16	0,12	0,11
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	5,50	5,65	6,21	10,9	23,1	40,4	57,8	43,4
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,88	0,90	0,99	1,74	3,68	6,43	9,19	6,90
AD x B	G'	10 <sup>4</sup> Pa	9,04	7,83	8,04	15,2	43,5	64,0	122	127
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	1,61	1,23	1,27	3,10	8,21	12,1	11,5	9,24
	tan δ		0,18	0,16	0,16	0,21	0,19	0,19	0,09	0,07
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	9,18	7,93	8,14	15,5	44,0	65,1	123	128
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	1,46	1,26	1,30	2,46	7,00	10,4	19,5	20,3
A188 x H99	G'	10 <sup>4</sup> Pa	4,62	4,36	5,07	13,1	31,5	61,5	94,6	91,4
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	0,86	0,83	1,02	2,81	5,41	7,62	7,58	5,77
	tan δ		0,19	0,19	0,20	0,21	0,17	0,12	0,08	0,06
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	4,70	4,43	5,17	13,4	32,2	62,0	94,9	91,5
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,75	0,71	0,82	2,14	5,13	9,86	15,1	14,6
C x A	G'	10 <sup>4</sup> Pa	5,84	3,95	3,65	3,85	5,44	8,46	16,2	10,7
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	1,05	0,65	0,59	0,58	0,90	1,50	2,61	1,80
	tan δ		0,18	0,16	0,16	0,15	0,17	0,18	0,16	0,17
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	5,93	4,00	3,70	3,89	5,51	8,60	16,5	10,9
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	0,94	0,64	0,59	0,62	0,88	1,37	2,62	1,73
Mais-Standard	G'	10 <sup>4</sup> Pa	36,8	26,5	24,2	22,8	26,9	38,6	37,2	27,1
	G''	10 <sup>4</sup> Pa	5,44	3,99	3,48	2,81	3,16	4,03	3,21	2,32
	tan δ		0,15	0,15	0,14	0,12	0,12	0,11	0,09	0,09
	G*	10 <sup>4</sup> Pa	37,2	26,8	24,5	23,0	27,1	38,8	37,3	27,2
	η*	10 <sup>4</sup> Pa · s	5,92	4,27	3,90	3,66	4,32	6,18	5,93	4,32

#### 8.2.4. Timesweepmessungen

Durch den Timesweep als typische Oszillationsmessung sollen die Teigentwicklung und die möglichen Wassertransportvorgänge in der Matrix beschrieben werden.

Die generellen Messbedingungen lauten:  $\gamma = 10^{-3}$ ,  $f = 1$  Hz,  $T = 25$  °C, Zeitdauer des Versuches 90 min. In Abb. 8.12 sind am Beispiel des Speicher- und Verlustmoduls sowie des Verlustfaktors die zeitabhängigen Verläufe von WM- und Mais-Standard dargestellt.

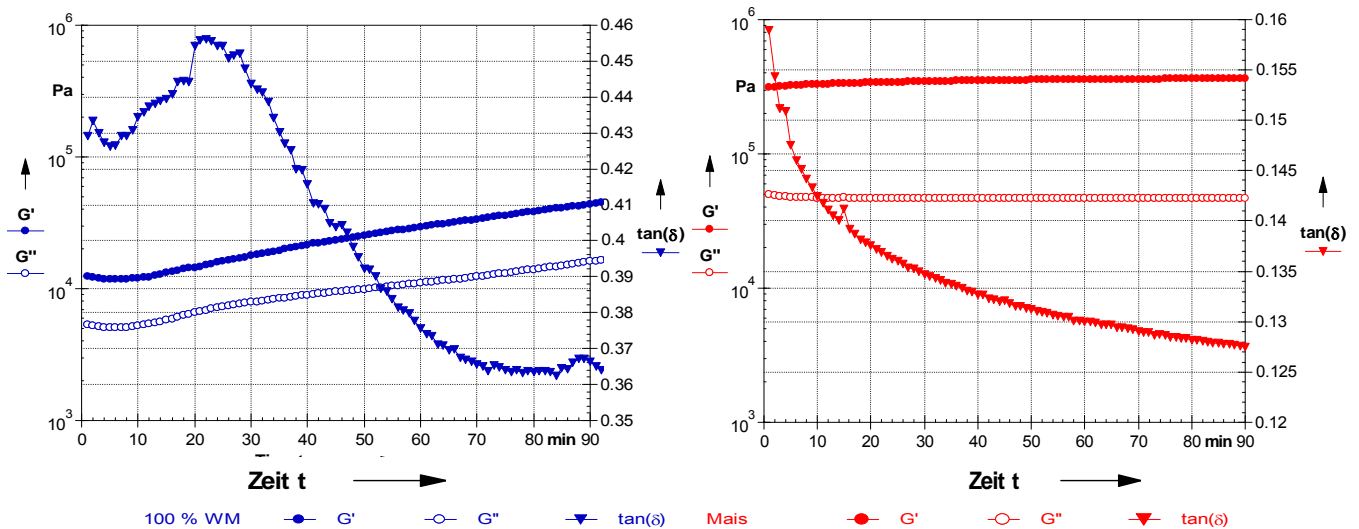


Abb. 8.12: Timesweep Vergleich Weizen und Mais-Standard

Erkennbar ist am abnehmenden Verlauf des  $\tan \delta$  beim Mais-Standard eine mit der Zeit sich verringernde freie Wassermenge, die offensichtlich in die vorhandenen Stärkekörner durch Leitung oder Diffusion eindringt. Die dynamischen Moduli unterliegen einer sehr geringen Änderung. Die dynamischen Moduli von WM-Teig zeigen in den ersten 5 Minuten kaum eine Änderung. In den folgenden 15 Minuten ist eine Strukturentwicklung zu beobachten. Dabei verändert sich der Kurvenverlauf der beiden Moduli und weist einen stetigen Anstieg auf und die Verlustfaktorkurve zeigt einen deutlichen ansteigenden Verlauf über der Zeit und signalisiert Wassertransport. Nach 20 Minuten fällt die  $\tan \delta$ -Kurve erneut.

In Abb. 8.13 sind am Beispiel des Speicher- und Verlustmoduls sowie des Verlustfaktors die zeitabhängigen Verläufe von Mais-Standard und Maisprobe A188 x H99 dargestellt.

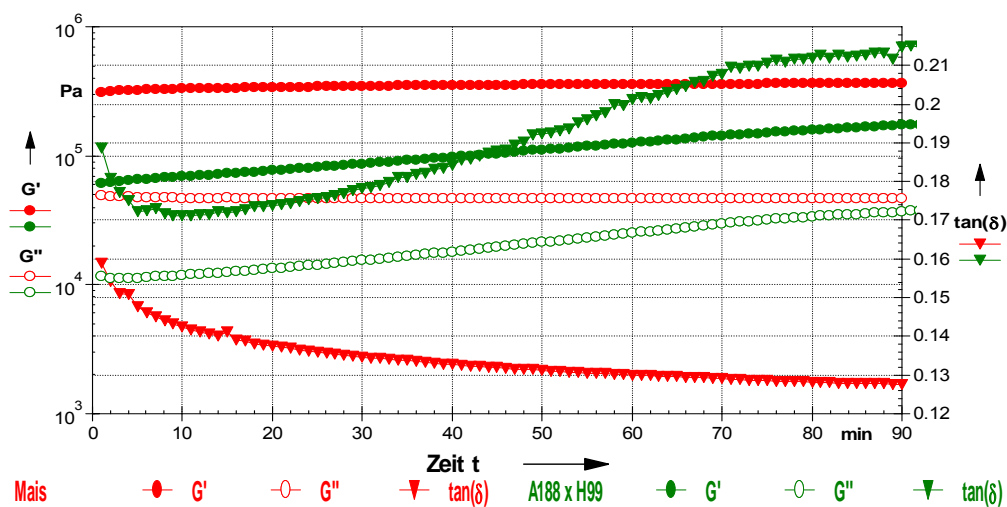


Abb. 8.13: Timesweep Vergleich der Mais-Standard und Maispräparation A188 x H 99



Der in Abb. 8.13 dargestellte Timesweep zeigt im Vergleich zum Mais-Standard einen Anstieg im Speicher- und Verlustmodul. Verändert im Vergleich zum Mais-Standard ist der Verlauf des  $\tan \delta$ , der nach einem Minimum ansteigt und viskose Relationen andeutet, was auf erste Proteininteraktionen zurückführbar sein könnte. In Abb. 8.14 erfolgt eine Zusammenstellung der Messergebnisse der Präparate B x A am Beispiel des Speicher- und Verlustmoduls sowie des Verlustfaktors im Vergleich zum WM- und Mais-Standard.

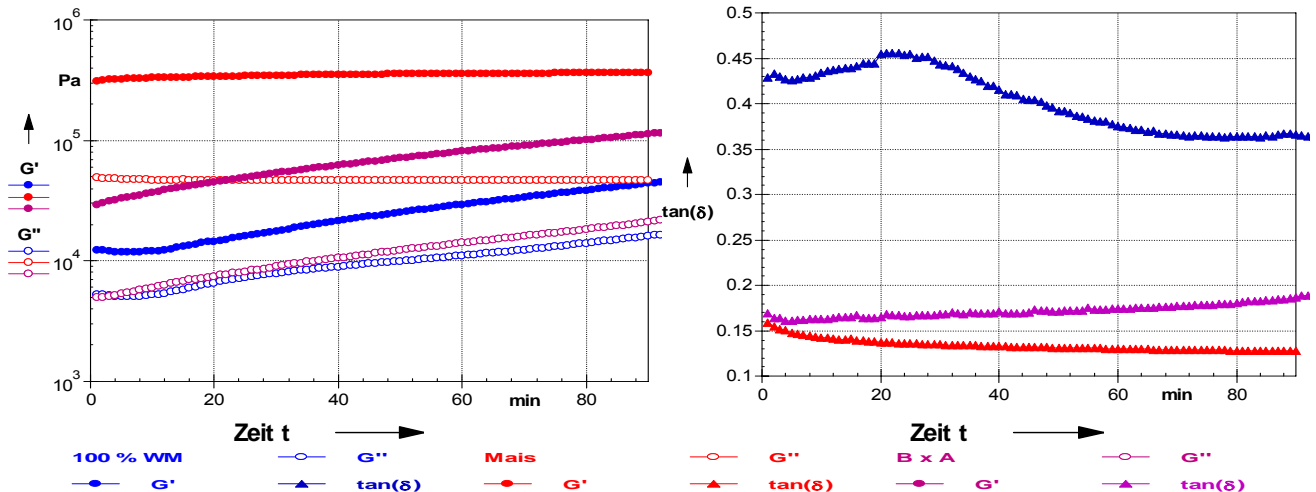


Abb. 8.14: Timesweep Vergleich der Maispräparation B x A mit WM- und Mais-Standard

Aus der Abb. 8.14 ist zu erkennen, dass die dynamischen Moduli im Vergleich zum Mais-Standard einen deutlichen Anstieg aufweisen. Diese Anstiege von Speicher- und Verlustmodul nähern sich am meisten dem Verlauf des Weizens an. Dies bestätigt die Aussage, dass die Präparation B x A aus materialwissenschaftlicher Sicht als dem Weizen am ähnlichsten einzuschätzen ist. Abb. 8.15 enthält die Timesweepmessungen aller Versuchsanstellungen am Beispiel des Speichermoduls und Verlustfaktors. Erkennbar sind deutlich 3 Versuchsklassen: (Weizenmehl, Mais und Präparationen).

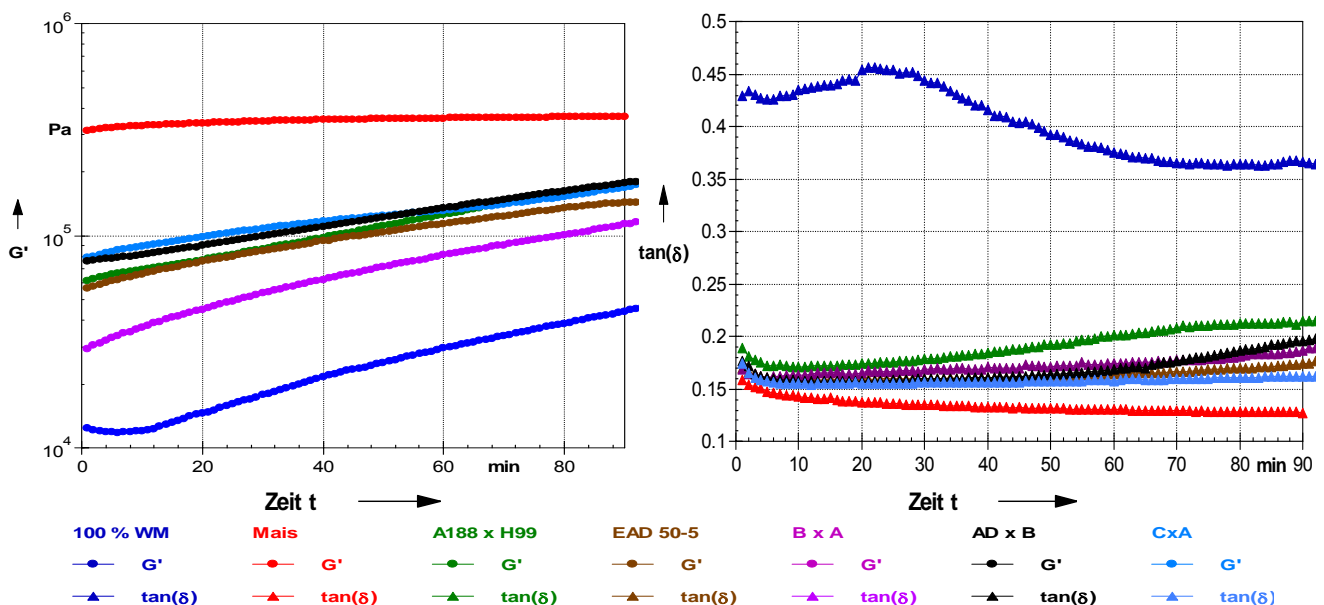


Abb. 8.15: Timesweep Vergleich der Maispräparation mit WM- und Mais-Standard

Die Speichermodulkurven zeigen ein spezifisches Verhalten. Mais bleibt konstant; Weizen steigt. Die Präparationen zeigen ein ansteigendes Verhalten über der Zeit und signalisieren Wassertransport.

### 8.3. Kriechversuch

Der Kriechversuch eignet sich für den Vergleich der materialwissenschaftlichen Eigenschaften der Versuchsmehle. Die Kriechversuche beschreiben die Relation (der viskosen und elastischen Anteile) des Prüfmateri als Einpunktmessung und sind nachfolgend in der Abb. 8.16 enthalten.

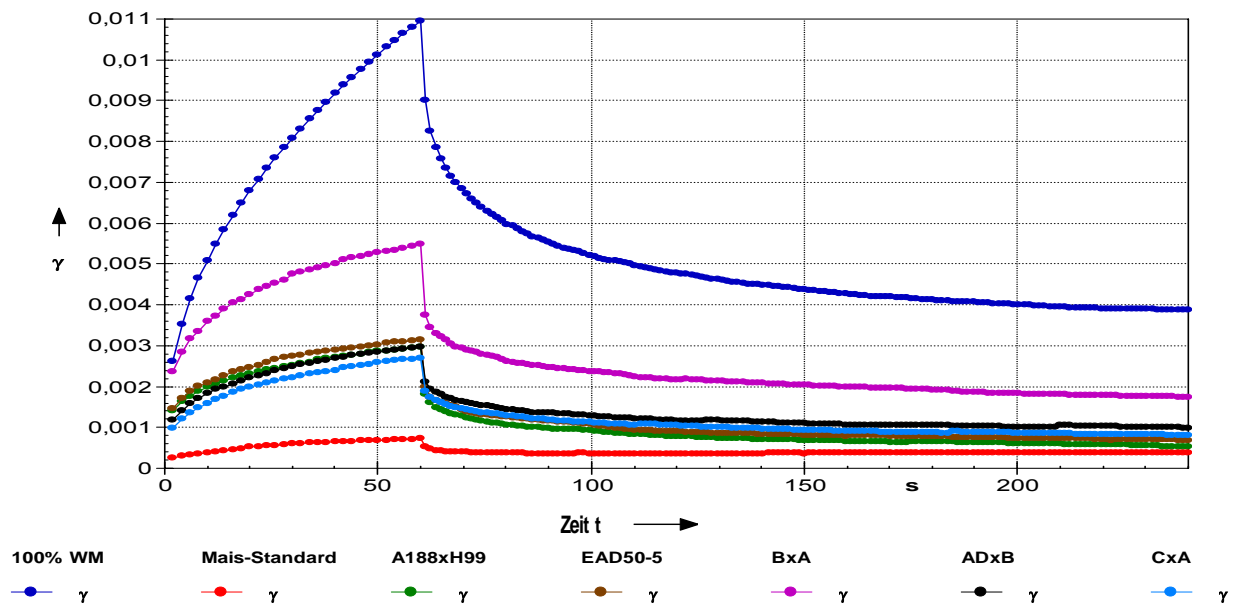


Abb. 8.16: Kriechversuch Vergleich sämtlicher Mais-Präparate mit WM- und Mais-Standard

Tab. 8.4: Kriechversuchsdaten Vergleich der Präparation sowie der WM- und Mais-Standard

Probe	Rheologische Kennwerte								
	$J_e$ $10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$	$\dot{\gamma}_3$ $10^{-4}$	$\gamma_e$ $10^{-2}$	$\gamma_v$ $10^{-2}$	$\gamma_{\max}$ $10^{-2}$	$\gamma_e / \gamma_{\max}$ %	$\eta_0$ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$G_0$ $\text{Pa}$	$\lambda$ $\text{s}$
100 % WM	14,1	0,98	0,72	0,38	1,09	66	508590	7092	71,7
B x A	7,49	0,25	0,37	0,17	0,55	67	1994600	13351	149
EAD 50-5	4,86	0,12	0,25	0,06	0,31	81	3956900	20576	192
A188 x H99	4,83	0,15	0,24	0,05	0,29	83	3381900	20704	163
AD x B	3,92	0,16	0,19	0,09	0,29	68	3091200	25510	121
C x A	3,73	0,15	0,18	0,08	0,26	69	3285900	26810	123
Mais	nicht erfassbar		0,03	0,04	0,07	43	nicht erfassbar		

Äußerst aussagefähig ist der Verlauf der Messkurven der durchgeführten Kriechversuche. Eindeutig ist am Beispiel dieser (alten) konventionellen Methode der gravierende Unterschied in den Struktureigenschaften zwischen Weizenteig und Maisteig sowie der Mais-Präparate erkennbar. Es ergibt sich für 60 s (Ende der Belastungskurve/Beginn der Kriechentlastungskurve) folgendes Ranking:



Weizen > **B x A** > EAD 50-5 = A 188 x H99 > AD x B > C x A > Mais-Standard

Aus materialwissenschaftlicher Sicht ist diese Präparation **B x A** als dem Weizen am ähnlichsten einzuschätzen. Im Vergleich zur Präparation **B x A** sind die viskoelastischen Eigenschaften von Maispräparation **AD x B** stark reduziert. Eingeschränkte Viskoelastizität im Vergleich zum Präparat **B x A** wird bei der Maisprobe EAD 50-5 ermittelt. Im Vergleich zu den anderen Präparationen schneidet das Maismehl im unteren Mittelfeld ab. Wobei die Präparate **A188 x H99** im Vergleich zum Mais-Standard ist hier höhere Rückstellkraft als Indikator für einen höheren elastischen Anteil bereits zu werten.

Aus der Tab. 8.4 ist zu erkennen, dass der WM-Teig im Vergleich zum Mais-Standard und den Maispräparationen die höchsten Werte der maximalen Deformation und Komplianz sowie der höchsten Rückstellungskraft (Prozentsatz elastischer Teil der maximalen Verformung) aufweist. Die Nullscherviskosität und der Schubmodul zeigen die geringsten Werte, was auf bessere Fließeigenschaften des Teigs hindeutet. Je größer die Nullscherviskosität und der Schubmodul sind, desto geringere Fliesseigenschaften zeigt der Teig (Tendenz nach Steifigkeit)

#### 8.4. Kapitelzusammenfassung

Mit konventionellen (Farinographuntersuchungen) und modernen Messmethoden (fundamentale rheologische Untersuchungen am Beispiel von Amplitudensweep, Frequenzsweep, Kriechversuch, Timesweep und Temperatursweep als Simulation des Backversuches) wird das rheologische Verhalten von gentechnisch verändertem Mais untersucht. Von der Universität Hamburg geliefertes (entkeimtes) Probenmaterial wurde vermahlen und vermessen. In allen Messausstellungen wurden durch die teigrheologischen Untersuchungen von 5 GVO-Proben sowie Mais- und Weizenmehl als Standard die Teigkonsistenz als vorrangig zu verändern die Proteininteraktion die Differenz zum Standard Weizenteig bewertet. Es stellte sich bei den Untersuchungen heraus, dass die Präparationen im Vergleich eine Veränderung zum mehr „viskoelastischen“ Verhalten erfahren hatten.

Im Vergleich zu Standardweizenmehl der Type 405 und übergebenen Mais Standard bilden die Präparationen eine eigene Versuchsklasse ab. Die Präparation B x A wird als beste gentechnische Veränderung in Richtung Viskoelastizität des Weizens anhand vieler Kriterien bewertet. Mit großem Abstand stellte sich also die Modifikation B x A (Kodierung) als dem Weizenprotein am nächsten heraus. Detaillierte Angaben sind in Tab. 8.4. aufgeführt. ( $\eta_0 \approx 25 \%$ ,  $G_0 \approx 50 \%$ ,  $\lambda \approx 200 \%$ ). Der Pflanzenzüchtung wurde mit Hilfe dieser Untersuchungen ein Auswahlkriterium/Indikator für den technologischen Effekt gentechnisch bewirkte Veränderungen ermöglicht. Die statistische Auswertung bestätigt, dass die Maispräparation B x A aus materialwissenschaftlicher Sicht am Weizen ähnlichsten einzuschätzen ist. Trotz der als am besten bewerteten Veränderung in der Variante B x A liegt ein hochsignifikante Unterschied zwischen WM-Teig und Maisprobe vor und indiziert weiteren Forschungsbedarf.

## 9. Hinweise für weiterführende Untersuchungen

Für weitere Untersuchungen der Kennwerte des Kichererbsenteigs und dessen Mischungen wird zunächst die Zerkleinerung der Kichererbsen durch eine Walzenstuhlmühle vorgeschlagen. Eine zeitgemäße und sichere Erfassung des Partikelspektrums bei der Zerkleinerung muss durch Laserpartikelanalytik erfolgen. Mit dieser Maßnahme kann der reale Einfluss der Proteinanreicherung bei Messungen eines vom Partikelspektrum her homogenen Mehlsystems im Vergleich zum Weizenmehl untersucht werden.

Die Frage, ob es während der intensiven Mahlbeanspruchung der Mehle durch Nachzerkleinerung zum Abbau von Proteinmolekülen (Mechanololyse mit Depolymerisation) kommt, sollte weiter untersucht werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde festgestellt, dass die Veränderung der Teigeigenschaften durch die Schwächung der Kleberbildung (im Vergleich zum Weizenmehl) des inkompatiblen Kichererbsenproteins infolge Überlagerung von Pentosaninteraktionen vorliegt.

Da neben der strukturellen Inkompatibilität zwischen den Proteinen von Kichererbsen und Weizen negative Superpositionen infolge des Einflusses des höheren Pentosangehalts (Polysaccharide) im Kichererbsenmehl vorliegen, wird eine tiefgründige Untersuchung des Pentosaneinflusses auf das viskoelastische Verhalten des Teigs empfohlen.

Des Weiteren wird empfohlen, die Oszillationsmessungen sowie Kriechversuch zur Ermittlung des Temperatureinflusses auf das Verarbeitungsverhalten von Teigen im Temperaturbereich von 15.....25 °C mit  $\Delta T = 2 \text{ K}$  zu untersuchen, da die Abhängigkeit der Temperatur bei der Erfassung des Speicher- und Verlustmoduls am größten war.

Eine weitere Untersuchung des Schüttwassereinflusses auf dynamische Moduli ist ebenfalls denkbar z. B. eine Teigausbeute von 70 %. Ausführlichere Hinweise zu diesen Messungen finden sich im Abschnitt 7.4.

Ein interessanter Aspekt der rheologischen Untersuchungen ist die Veränderung der Materialeigenschaften des Teiges durch Fermentationsprozesse (Hefegärung) sowie die Bestimmung der Backeigenschaften (Simulation durch eine Temperatursweepmessung).

Für die Backwarenindustrie werden entsprechende Untersuchungen an Mehlen aus anderen Getreidesorten wie Gerste und Mais zur Ermittlung der Backeigenschaften und des Teigverarbeitungsverhaltens im gleichen Konzentrations- und Temperaturbereich vorgeschlagen.

Hier sind aufgrund der veränderte botanische Herkunft bzw. andere chemische Zusammensetzung abweichende Eigenschaften zu erwarten.

## 10. Zusammenfassung

Gegenstand der Promotionsschrift ist eine lebensmittelmateriawissenschaftliche und technologische Analyse der Prozessabläufe und strukturellen Veränderungen bei der Herstellung von mit Kichererbsenprotein angereicherten Backwaren. In den Entwicklungsländern besitzt der Zusatz von Leguminosen zu traditionellen Lebensmitteln sowie zu Getreidemehl eine große Bedeutung, um den Nährwert des Brotgetreides zu verbessern.

Mit Hilfe von unterschiedlichen rheologischen und technologischen Versuchsanstellungen sollen Veränderungen im Verarbeitungsverhalten und der Backwarenqualität bewertet werden. Die Produktionsschritte vom Rohstoff bis zum Handelsprodukt sollen aus lebensmittelmateriawissenschaftlicher Sicht mit dem vorhandenen Methodenspektrum untersucht werden.

Eine Inhaltsstoffanalyse der in den Versuchen eingesetzten Mehlkomponenten erfolgt und bestätigt die unterschiedliche chemisch-analytische Zusammensetzung von Weizen- und Kichererbsenmehl.

Als Zerkleinerungsmaschinen wurde eine Hammermühle für die Kichererbsen eingesetzt. Die Partikelgrößenbestimmung am Beispiel von Einzel- und Summenhäufigkeit wird mit Hilfe von Laserpartikelmessungen durchgeführt. Eine weitere Differenzierung des Kichererbsenmehls in die Unterfraktionen F1, F2 und F3 wird durchgeführt. Die Kichererbsenkennwerte liegen mit Ausnahme der Fraktion F3 in einer Größenordnung.

Erstmals entsteht hier neben den unterschiedlichen Proteinspektren zwischen Weizen- und Kichererbsen der Verdacht, dass das Partikelspektrum einen Einfluss auf das viskoelastische Verhalten der Teige ausüben kann. Erhebliche Unterschiede im Mahlgut der Gesamtfractionen von Weizenmehl und Kichererbsenmehl werden am Beispiel der  $d_{50}$  und  $d_{90}$ -Daten (hier größte Unterschiede) nachgewiesen. Binomialverteilungen liegen ausgeprägt für die Mahlprodukte F2 und Kichererbsen vor (Kornsprung).

Die Ergebnisse der konventionellen teigrheologischen Untersuchungen am Beispiel von Farinograph- und Extensographuntersuchungen dienen vorrangig der Bewertung der Proteineigenschaften (Interaktionen und Kompatibilität) der eingesetzten Mehle bzw. Mehlmischungen. Bereits hier werden eindeutige Unterschiede zwischen Weizen und Kichererbsenmehl festgestellt. Ein reiner Kichererbsenteig kann mittels Farinographuntersuchung nur bedingt ausgewertet werden.

Die Mehlmischungen 10, 20 und 30 % Kichererbsenmehlanteil weisen am Beispiel der untersuchten Kennwerte Teigkonsistenz, Wasseraufnahme, Teigentwicklungszeit, Teigstabilität und Teigerweichung ein unterschiedliches Verhalten auf. Die konventionelle Weizenanalytikauswertung ist möglich. Als Ursache kommen wahrscheinlich das veränderte Wasserbindevermögen und die Struktur-Texturausbildung als interne Antagonisten in Frage. Die weiter durchgeführten Fraktionsmessungen weisen partikulierungsbedingt erhebliche Abweichungen untereinander auf. Bereits bei 30 % Zumischung von F1 als am höchsten mechanisch aufgeschlossenem Mehl wird der typische Messverlauf eines Weizenmehls verlassen. Sämtliche Ergebnisse liegen numerisiert in tabellarischer Form vor.

Analoge Aussagen gelten für die Extensographuntersuchungen. Die Verformbarkeit des Teiges wird durch Kichererbsenanteile aufgrund des schlechter ausgebildeten Glutennetzwerkes reduziert.

Die Verkleisterungseigenschaften des Teigs wurden mittels Mikro Visko-Amylo-Graph-Messungen untersucht. Auch hier werden große Unterschiede zwischen den Einsatzkomponenten und den Mischungen festgestellt. Generell wird eine Zunahme der Verkleisterungstemperatur und Verkleisterungszeit der Mehlmischungen als Einfluss der Kichererbsenstärke ermittelt. Anhand der Ergebnisse der konventionellen Teiguntersuchungen kann eine Bestätigung der Literaturergebnisse vorgenommen werden. Mit zunehmender Kichererbsenkonzentration und verringertem mechanischem Aufschluss sinkt die viskoelastische Relation und damit das Verarbeitungsverhalten, was vorzugsweise mit dem Abbau des Glutennetzwerkes infolge des Vorhandenseins nicht kompatibler Proteine begründet werden kann. Die Fraktion F1 erscheint hier dem Weizenteig am nächsten, siehe auch Kapitel. 7.

Neben der Proteinkompatibilität scheinen Fraktionierungen ebenfalls von Bedeutung für die Teigstrukturausbildung, vorzugsweise am Beispiel der Fraktion F3, die sich als Singularität abbildet.

Am Beispiel von Oszillationsmessungen im Modus Amplituden-, Frequenz- und Temperatursweep wurden die Strukturuntersuchungen der Teige aus dem Kapitel. 6 mit modernen Analyseverfahren fortgesetzt. Die erhaltenen physikalischen Größen am Beispiel des Speicher- und Verlustmoduls sind dabei objektiv und vergleichbar.

Bereits die Amplitudensweepmessung liefert den Nachweis, dass der linear-viskoelastische Bereich bei Weizenteig (0,6) im Vergleich zu Kichererbsenteig (0,1) wesentlich größer ist. Dabei ist der mit Kichererbsen angereicherte Teig fester, aber spröder (bockig). Ein Ranking für die Mischungen wird abgeleitet. Analoge Ergebnisse werden für die Frequenzsweepmessungen als eigentliche Strukturanalyse gefunden. Eine Numerisierung der Versuchsdaten zur Verallgemeinerung der Strukturierungsmechanismen wird durchgeführt.

Die Schwächung der notwendigen viskoelastischen Relation wird am Beispiel des Verlustfaktors nachgewiesen. Für die Mischungen ergibt sich, dass der Verlustfaktor auf höherem Level infolge der erhöhten Wasseraufnahme vorliegt und damit die Teigformung vereinfacht wird. Dabei leidet jedoch die Teigstabilität am Beispiel der viskoelastischen Komponente.

Mit Hilfe von Temperatursweepmessungen wird das Backverhalten simuliert. Eine Masterkurve (Unikat) beschreibt die ablaufenden stofflichen Veränderungen bei der Erwärmung von 20 auf 90 °C. Nachgewiesen werden die Temperaturbereiche mit Erweichung, Proteindenaturierung und Stärkeverkleisterung. Eine Beschreibung der funktionellen Eigenschaften von Protein und Stärke findet zugeordnet statt. Es wurde nachgewiesen, dass die Teige im optimalen Temperaturbereich, der Salzkonzentration sowie der Schüttwassermenge die beste Strukturstabilität und Homogenität bzw. Verarbeitungsfähigkeit aufweisen.

Durch diese Untersuchungen werden ebenfalls die Erfahrungswerte des Bäckers bestätigt (Temperatur ca. 25 °C, Teigausbeute ca. 62 % und Salzkonzentration ca. 1,5 %).

Nachgestellte Kriechversuche liefern am Beispiel des Gesamtschubmoduls  $G_0$  und der Ruhescherviskosität  $\eta_0$  analoge Aussagen wie die Oszillationsmessungen, basieren aber lediglich auf „Einpunktuntersuchungen“.

Bei den technologischen Untersuchungen (Einteigen, Backen und Bewertung des Gebäcks) werden erneut erhebliche Unterschiede zwischen den Backeigenschaften von Weizen- und Kichererbsenteig gefunden. Die Messungen der Backeigenschaften der Mehlmischungen weisen erneut die singuläre Stellung des reinen Kichererbsenmehls nach. Die Fraktion F1 liegen dabei mit dem Weizenteig in einem engen Ereignisfeld.

Eine umfangreiche Bewertung der Backeigenschaften beendet das Kapitel 7 und sichert die Anwendung bekannter Kriterien der DLG zur Bewertung von Gebäcken. Der Back- und Verzehrttest bestätigt eine kritische Kichererbsenmehlkonzentration im Weizenbrotteig von > 20 %.

Mit konventionellen (Farinographuntersuchungen) und modernen Messmethoden (fundamentale rheologische Untersuchungen am Beispiel von Amplitudensweep, Frequenzsweep, Kriechversuch, Timesweep und Temperatursweep als Simulation des Backversuches) wird das rheologische Verhalten von gentechnisch verändertem Mais untersucht. Von der Universität Hamburg geliefertes (entkeimtes) Probenmaterial wurde vermahlen und vermessen. In allen Messausstellungen wurden durch die teigrheologischen Untersuchungen von 5 (gentechnisch veränderte)-Maisproben sowie Mais- und Weizenmehl als Standard die Teigkonsistenz als vorrangig zu verändernde Proteininteraktion die Differenz zum Standard Weizenteig bewertet.

Es stellte sich bei den Untersuchungen heraus, dass die Präparationen im Vergleich eine Veränderung zum mehr „viskoelastischen“ Verhalten erfahren hatten. Im Vergleich zu Standardweizenmehl der Type 405 und übergebenen Mais Standard bilden die Präparationen eine eigene Versuchsklasse ab.

Die Präparation B x A wird als beste gentechnische Veränderung in Richtung Viskoelastizität des Weizens anhand vieler Kriterien bewertet. Mit großem Abstand stellte sich die Variante B x A (Kodierung) anhand des Speichermodulverlaufs als dem Weizenprotein am nächsten heraus.

Der Pflanzenzüchtung wurde mit Hilfe dieser Untersuchungen ein Auswahlkriterium/Indikator für den technologischen Effekt gentechnisch bewirkte Veränderungen ermöglicht.

Die statistische Auswertung bestätigt, dass die Maispräparation der Variante B x A aus materialwissenschaftlicher Sicht am Weizen ähnlichsten einzuschätzen ist. Trotz der als am besten bewerteter Veränderung in der Variante liegt ein hochsignifikanter Unterschied zwischen WM-Teig und der besten Maispräparation vor und indiziert weiteren Forschungsbedarf.

**11. Literaturverzeichnis**

- [1] Iqbal, A., Khalil, I.A., Ateeq, N. and Khan, M.S. (2006): Nutritional quality of important legumes. *Journal of food chem.* 97: 331-335.
- [2] Van der Poel, A.F.B. (1990): Effect of processing on antinutritional factors and protein nutritional value of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). A review. *Animal Feed Science and Technology* 29: 179 - 208.
- [3] Nestares, T., López-Frías, M., Barrionuevo M., and Urbano, G. (1996): Nutritional assessment of raw and processed chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein in growing rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 44: 2760 - 2765.
- [4] Deshpande, S. S. (1992). Food legumes in human nutrition: a personal perspective. *Reviews in Food Science and Nutrition.* 32: 333 – 363.
- [5] Amjad, I., Khalil, I. A., and Shah, H. (2003): Nutritional yield and amino acid profile of rice protein a influenced by nitrogen fertilizer. *Sarhad Journal of Agriculture “international journal of Agricultural University . Pakistan”*.19: 127 - 134.
- [6] Farzana, W., and Khalil, I. A. (1999): Protein quality of tropical food legumes. *Journal of Science and Technology.* 23: 13 - 19.
- [7] Wang, T. L., Domoney, C., Hedley, C.L., Casey, R., and Grusak, M.A. (2003): Can we improve the nutritional quality of legume seeds. *Plant Physiology.* 131: 886 - 891.
- [8] Acheremowicz, B., Korus, J., Curylok, K. (2000): the effect of different pulse additives to bread products, *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Food Science and Technology*, Volume 3, Issue 2.
- [9] Steinke, F.H.; Hopkins, D.T. (1983): Complementary and supplementary effects of vegetable proteins *Cereal Foods World.* 28: 338 - 341.
- [10] Lindell, M. J and Walker, C. E. (1984): Soya enrichment of chapaties made from wheat and non-wheat flours. *Cereal Chemistry.* 61: 435.
- [11] Fernandez, M.L and Berry, J.W. (1989): Rheological properties of flour and sensory characteristics of bread made from germinated chickpea. *International Journal of Food Science and Technology* 24:103 -110.
- [12] Shehata, N.A., Darwish, N., El-Nahry, F., and Abdel Razek, F.A. (1988). Supplementation of wheat flour with some local legumes. *Die Nahrung* 32: 3 - 8.
- [13] Hallab, A.H and Khatchadourian, H.A. (1974): The nutritive value and organoleptic properties of white arabic bread supplementation with soyabean and chickpea. *Cereal Chemistry.* 51: 106.

- [14] Ruiz R.G., Price K.R., Arthur A.D., Rose M.E., Rhodes M.J.C., & Fenwick R.G. (1996): Effect of soaking and cooking on the saponin content and composition of chickpeas (*Cicer arietinum*) and lentils (*Lens culibaris*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 44:1526 - 1530.
- [15] FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nation (2009): The national version of FAOSTAT; <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>
- [16] AOAD, Arab Organization of Agriculture Development (2009): Agricultural statistical yearly book vol: 29. [http://www.aoad.org/Statistical\\_Yearly\\_Book\\_Vol\\_29.pdf](http://www.aoad.org/Statistical_Yearly_Book_Vol_29.pdf)
- [17] Klei, B. P., and Raidl, M. A. (1986): Use of field-pea flours as protein supplements in foods. *American Chemical Society Symposium Series Vol. 31(2)*: 19-31.
- [18] Gutmann, M. (1998): Süßlupine, Möglichkeiten der Veredelung zu Lebensmitteln im Erzeugerbetrieb. In: Wink, M. (Hrsg.) *Lupinen in Forschung und Praxis*, S. 179 - 188.
- [19] Jambunathan, R. Singh, U. and Subramanian, V. (2000). Grain quality of sorghum, pearl millet, pigeon-pea, and chick-pea, International Crops Research Institute for the Semi-arid Tropics, Patancheru, India.
- [20] Berweger, T., (2003): *Dinkel „Das gesund Getreide“* Auflage: 1, ISBN-10: 3775004130, Hädecke Verlag.
- [21] Souci, S.W. Fachmann, W. and Kraut, H. (1994): *Hülsenfrüchte und Ölsaaten*. In: *Die Zusammensetzung der Lebensmittel. Nährwert-Tabellen*. 4. Aufl. 762 - 763. CRC-Press, London, Tokio.
- [22] Gassner, G. (1973): *Mikroskopische Untersuchung pflanzlicher Lebensmittel*, G. Fischer-Verlag, Stuttgart.
- [23] Stein von Kamienski und Jancke, I. (1975): Untersuchungen über Bau, chemismus und submikroskopische Struktur der Palisadenschicht von Leguminosensamenschalen, *Mikroskopie*. 12: 357.
- [24] Spruny, M.: (1972): Structure of the hypodermal zone in the testa of certain leguminous seeds, *Mikroskopie*. 28: 20.
- [25] Sayer, S., Turhan, M., Sundaram, G., (2001): Analysis of chickpea soaking by simultaneous water transfer and water-starch reaction, *Journal of Food Engineering* 50: 91 - 98.
- [26] Stählin, A., (1957): *Leguminosae, Hülsenfruchtgewächse*. In: *Die Beurteilung der Futtermittel. Methodenbuch Bd. XII*. 328-399. Verlag Neumann, Radebeul und Berlin.
- [27] Duke, J. A., (1981): *Handbook of legumes of world economic importance*. Plenum Press, New York, London. 102 - 106.



- [28] Almeida Costa, G. E., Monici. K. S., Reis. M. P. S., and Admar. C. O. (2006): Chemical composition, dietary fibre and resistant starch contents of raw cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes, *Food chemistry* 94: 327-330.
- [29] Morr, C. V., and HA, E. Y. W.: (1993): Whey protein concentrates and isolates: Processing and functional properties. *Critical reviews in Food Science and Nutrition*. 33: 431 - 476.
- [30] Muschiolik, G.(1991): Proteinprodukte als funktionelle Lebensmittelkomponente. *Lebensmitteltechnik* 23: 630 - 636.
- [31] Kinsella, J. E. (1979): Functional properties of soy proteins. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 56: 242 - 258.
- [32] Dhawan, K., Malhotra, S., Dahiya, B. and Singh, D. (1991): Seed protein fractions and amino acid composition in gram (*Cicer arietinum*). In *Plant Foods for Human Nutrition*, 41 (3): 225 - 232.
- [33] Narpinder, S., Maninder, K., Kawaljit S.S., and Harmeet, S.G (2004): Physicochemical, thermal, morphological and pasting properties of starches from some indian black gram (*Phaseolus mungo* L.) cultivars. *Starch / Stärke* 56: 535 - 544.
- [34] Cheryl, A. M., Bogracheva, T.Y., Sandra E. H and Cliff L. H. (2004): Development and testing of methods to screen chickpea flour for starch characteristics. *Starch / Stärke* 56: 215 - 224.
- [35] Chung, H.J, Liu, Q, Donner, E.A, Hoover, R., Warkentin, T.D, and Vandenberg, A. (2008) "Composition, molecular structure, thermal properties, pasting characteristics and in vitro digestibility of starches from newly released Canadian cultivars of pea, lentil and chickpea." *Cereal Chemistry*, 85 (4): 473 - 781.
- [36] Sung, W.C., and Stone. M. (2004): characterization of legume starches and their noodle quality *Journal of Marine Science and Technology*, 12 (1): 25 - 32.
- [37] Moosbaum GmbH., [www.moosbaum.de](http://www.moosbaum.de) Kalender-Motive (2003).
- [38] Exkursionsprotokoll :Versuchsanstalt für Getreideverarbeitung - 5. April (2001), Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität für Bodenkultur Wien.
- [39] Schäfer, W. (1985): *Das Getreide eine Waren- und Sortenkunde* Verlag Alfred Strothe, 5. Auflage.
- [40] Klingler, R. W. (1995): *Grundlagen der Getreidetechnologie* Behr's Verlag Hamburg,
- [41] Belitz, H-D.; Grosch, W.; Schieberle, P. (2001), *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*. 5. Auflage, Springer – Verlag Berlin 660 – 677.
- [42] Hou, G., Yamamoto, H. and P. K. W. NG (1996): Relationships of quantity of gliadin subgroups of selected U. S. soft wheat flours to rheological and baking properties. *Cereal Chemistry*. 73 (3): 352 - 357.

- [43] Weipert, D. (1978): Rheologische Probleme zur Charakterisierung von Roggen- und Weizenteigen Mühle und Mischfuttersystem 115 (20): 281 - 287.
- [44] Wrigley, C. W, Bietz, J. A. (1988): Proteins and amino acids wheat chemistry and technology AACCC (Pomeranz, Y.): 159 - 275.
- [45] Kim, J.J., Kieffer, R., Belitz, H.D (1988): Rheologische Eigenschaften von rekonstituierten Weizenklebern mit variierenden Anteilen an Prolaminfraktionen verschiedenen Getreidearten. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung-Forschung. 186: 16 - 21.
- [46] Rohrlach, M. (1973): Wege und Umwege zur Klärung der Kleberproteinstruktur Getreide Mehl und Brot 27 (11): 337 - 342.
- [47] Köhler, P., Großberger, A., Schieberle, P. (1990): Fraktionierung und Rekombination von Weizenmehl- Einfluss auf Teig rheologie und Backverhalten. Getreide Mehl und Brot 53 (1): 16 - 19.
- [48] Evers, A. D., Lindley, J. J. (1977): The particle-size distribution in wheat endosperm Starch. Journal of the Science of Food and Agriculture. 28: 98 - 102.
- [49] Meuser, F., Reimers, H., Fischer, G (1977): Physikalische und chemische Untersuchungen an Mehlen aus unterschiedlichem vermahlendem Weizen im Hinblick auf deren Qualität Mühle und Mischfuttersystem 114 (13): 180 - 187.
- [50] Münzing, K. (2006): Stärkebeschädigung bei Weizen –Analysenmethoden und Auswirkungen auf die Verarbeitung. Bundesforschungsanstalt Ernährung und Lebensmittel -Standort Detmold - 57. Tagung für Müllereitechnologie vom 12. - 13. September in Detmold.
- [51] Klingler, R. W., Meuser, F., Niediek, E. A. (1986): Einfluss der Art der Energieübertragung auf strukturelle und funktionelle Merkmale von Stärke. Starch / Stärke 38 (2): 40 - 44.
- [52] Pelshenke, P. F., Seibel, W., Zwingelberg, H. (1961): Zerkleinerung, Windsichtung und Stärkebeschädigung. Die Mühle 28 (44): 573 - 578.
- [53] Farrand, E. A. (1972): The influence of particle size and starch damage on the characteristic of bread flour. The bakers Digest, February: 22 - 26.
- [54] Dappolonia, B. L., and Gilles, K. A. (1971): Pentosans associated with gluten Cereal Chemistry. 48: 427.
- [55] Jelaca, S. L. Hlynka, I. (1972): Effect of wheat flour pentosans in dough, gluten and bread. Cereal Chemistry. 49: 489.
- [56] Mac Arthur, I. A., Dappolonia, B. L. (1977): The carbohydrates of various pin milled and air-classified flour streams. II. Starch and pentosans. Cereal Chemistry. 54: 669.

- [57] Simmonds, D.H., et al. (1972): The effect of lipid on the solubility and molecular weight Range of wheat gluten and storage proteins. *Cereal Chemistry*. 48: 317.
- [58] Kieffer, R. (2005): Wirkungsmechanismen von Emulgatoren im Weizenteig, 56 Tagung für Getreidechemie, Detmold.
- [59] Prof. Dr. Tomas. Institut für Verfahrenstechnik Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik, , Uni Magdeburg.
- [60] Siebtechnik . GmbH.de <http://www.siebtechnik.com>
- [61] Eliasson, A.C. (1990): Rheological properties of cereal proteins. In: FARIDI, H. and FAUBION, J. M. (Ed.). *Dough Rheology and Baked Product Texture*. Van Norstrand Reinhold, New York.
- [62] Ewart, J. A. D. (1979): Glutenin structure. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 30: 482 – 492.
- [63] Ewart, J. A. D. (1977): Re-examination of the Linear glutenin hypothesis. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 28: 191 - 199.
- [64] Graveland, A., Boseveld, P., Lichtendonk, W. J., Marselle, J. P., Moonen, J. H. E. and Scheepstra, A. (1985): A model for the molecular structure of glutenins from wheat flour. *Journal of Cereal Science*. 3: 1 - 16.
- [65] Belitz, H. D., Kiefer, R., Seilmeier, W. and Wieser H. (1986): Structure and function of gluten proteins. *Cereal Chemistry*. 63 (4): 337 - 341.
- [66] Hussain, A. and Lukow, O. M. (1997): Influence of gliadin-rich subfractions of glenlea wheat on the mixing characteristic of wheat flour. *Cereal Chemistry*. 74: 791 - 799.
- [67] Weegles, P. L., Marseille, J. P., Bosveld, P. and Hamer, R. J. (1994): Largescale separation of gliadins and their bread-making quality. *Journal of Cereal Science* .20: 253 - 264.
- [68] Van lonkhuijsen, H. J., Hamer, R. J. and Schreuder, C. (1992): Influence of specific gliadins on the breadmaking quality of wheat. *Cereal Chemistry*. 69 (2): 174 - 177.
- [69] McMaster, G. J. and Bushuk, W. (1983): Protein-carbohydrate complex in gluten: Fractionation and proximate composition. *Journal of Cereal Science*. 1: 171 -184.
- [70] Shelton, D. R. and Dappolonia, B. L. (1985): Carbohydrate functionality in the baking process. *Cereal Foods World*. 30: 437 - 442.
- [71] Greenwell, P. and Schofield, J. D. (1986): A starch granule protein associated with endosperm softness in wheat. *Cereal Chemistry*. 53: 379 - 380.

- [72] Hoseney, R. C., Finnky, K. F., Shogren, M. D. and Pomeranz, Y. (1969): Functional (breadmaking) and biochemical properties of wheat flour components. II. Role of water-solubles. *Cereal Chemistry*. 46: 117 - 123.
- [73] Hoseney, R. C., Finnky, K. F. and Pomeranz, Y.(1971): Functional (Breadmaking) and biochemical properties of wheat flour components. VIII. Starch. *Cereal Chemistry*. 48: 191 - 201.
- [74] Nierle, W., Kersting, H.J.(1999), Einflußfaktoren auf Stärke / Proteintrennungen. *Getreide, Mehl und Brot* 53: 20 - 26.
- [75] Olcott, L, H. S. and Mecham, D. K.: (1947): Characterisation of Wheat Gluten. I. Protein-Lipid complex formation during doughing of flours. Lipoprotein nature of the glutenin fraction. *Cereal Chemistry*.24: 407 - 414.
- [76] Bekes, F., Zawistowska, U. and Bushuk, W. (1983): Protein-Lipid complex in the gliadin fraction. *Cereal Chemistry*. 60 (5): 371 - 378.
- [77] Carcea, M. and Schofield, J. D. (1996): Protein-Lipid interactions in wheat gluten: Reassessment of the occurrence of lipid-mediated aggregation of protein in the gliadin fraction. *Jouranal of Cereal Science*. 24: 101 - 113.
- [78] Pomeranz, Y. (1983): Molecular approach to breadmaking: An update and new perspectives. *The Bakers´ Digest*. 57: 72 - 86.
- [79] Marion, D., Le roux, C., Akoka, S., Tellier, C. and Gallant, D.(1987): Lipid protein interactions in wheat gluten: a phosphorus nuclear magnetic resonance spectroscopy and freeze-fracture electron Microscopy Study. *Journal of Cereal Science*. 5: 101 - 115.
- [80] Graveland, A.(1988): Struktur und funktionelle Eigenschaften von Gluteninen. *Getreide Mehl und Brot*. 42 (2): 35 - 38.
- [81] Skerritt, J. H., Hac, L. and Bekes, F. (1999): Depolymerisation of the glutenin macropolymer during dough mixing: I. Changes in levels, molecular weight distribution, and overall composition. *Cereal Chemistry*. 76 (3): 395 - 401.
- [82] Skeitt, J. H., Hac, L., Lindsay, M. P. and Bekes, F. (1999): Depolymerisation of the glutenin macropolymer during dough mixing: II. Differences in retention of specific glutenin subunits. *Cereal Chemistry*. 76 (3): 402 - 409.
- [83] Pomeranz, Y. (1988): *Wheat Chemistry and Technology* Vol. 1 und 2 AACC.
- [84] Sullivan, B., Howe, M., Schmalz, F. D. and Astleford, G. R. (1940): The action of oxidizing and reducing agents on flour. *Cereal Chemistry*. 17: 507 - 528.

- [85] Frater, R., Hird, J. F. R., Moss, H. J. and Yates, J. R. A. (1960): A role for thiol and disulphide groups in determining the rheological properties of dough made from wheaten flour. *Nature*. 186: 451 - 454.
- [86] Tilley, K. A., Benjamin, R. E., Bagorogoza, K. E., Okot-Kotber, B. M., Prakash, O. and Kwen, H. (2001): Tyrosine cross-links: molecular basis of gluten structure and function. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49: 2627 - 2632.
- [87] Weegels, P. L., Hamer, R. J. and Schofield, J. D. (1997): Depolymerisation and repolymerisation of wheat glutenin during dough processing. II. Changes in composition. *Journal of Cereal Science* 25: 155 - 163.
- [88] Bushuk, W., Hay, R. L., Larsen, N. G., Sara, R. G., Simmons, L. D. and Sutton, K. H. (1997): Effect of mechanical dough development on the extractability of storage proteins from bread dough. *Cereal Chemistry*. 72 (4): 389 - 395.
- [89] Seckinger, H. L. and Wolf, M. J. (1971): Electron microscopy of endosperm protein from hard and soft wheats. *Cereal Chemistry*. 47: 236 - 243.
- [90] Bernardin, J. E. and Kasarda, D. D. (1973): Hydrated protein fibrils from wheat endosperm. *Cereal Chemistry*. 50: 529 - 536.
- [91] Amend, T. (1995): Der Mechanismus der Teigbildung: Vorstoß in den molekularen Strukturbereich. *Getreide Mehl und Brot* 49 (6): 359 - 362.
- [92] Dexter, J. E. / et. al. (1994): The effect of protein content and starch damage on the physical dough properties and bread making quality of canadian durum wheat. *Journal of Cereal Science* 10: 139 - 151.
- [93] Oliver, J. R. and Allen, H. M. (1992): The prediction of baking performance using the farinograph and extensograph. *Journal of Cereal Science*. 15: 79 - 85.
- [94] Weipert, D.: *Brotgetreide und seine Produkte* (1993). In: D. Weipert, Tscheuschner, H.D. and Windhab (Herausg.) *Rheologie der Lebensmittel*. Behr's Verlag, Hamburg.
- [95] Stevens, J., Evers, A.D. (1983): Der Mechanismus der Stärkebeschädigung, *Getreide Mehl und Brot*. 37 (4): 101 - 106.
- [96] Handreck, B., Pötschke, L. (1996): Einfluss der Prallzerkleinerung und Mehlqualität bei der Vermahlung von Dunsten aus unterschiedlichen Weizensorten, *Getreide Mehl und Brot* 50 (3): 159 - 163.
- [97] Gupta, R. B., Batey, I. L. and Macritchie, F. (1992): Relationships between protein composition and functional properties of wheat flours. *Cereal Chemistry*. 69 (2): 125 - 131.

- [98] Barnes, W. C. and Hare, R. A. (1996): Glutenin aspects of dough mixing tolerance. In: Wrigley, C. W., (Ed.). *Gluten Proteins*. Cereal Chemistry Division, Melbourne, 272 - 273.
- [99] Uthayakumaran, S., Gras, P. W., Stodard, F. L. and Bekes, F. (1999): Effect of varying protein content and glutenin-to-gliadin ration on the functional properties of wheat dough. *Cereal Chemistry*. 76 (3): 389 - 394.
- [100] Weipert, D. (1991): Uniaxiale und biaxiale Dehnung von Weizenteigen. 2. Teil: Bewertung von Weizensorten und –mahlerzeugnissen durch Extensogramm und Alveogramm. *Getreide-Mehl und Brot* 45 (4): 167 - 172.
- [101] Weegels, P. L., Hamer, R. J. and Schofield, J. D. (1996): Critical Review: functional properties of wheat glutenin. *Journal of Cereal Science*. 23: 1 - 18.
- [102] Lagudah, E. S., O'Brien, L. and Halloran, G. M. (1988): Influence of gliadin composition and high molecular weight subunits of glutenin on dough properties in a F3 population of bread wheat cross. *Journal of Cereal Science*. 7: 33 - 42.
- [103] Wooding, A. R., Kavale, S., Macritchie, F. and Stoddard, F. L. (1999): Link between mixing requirements and dough strength. *Cereal Chemistry*. 76 (5): 800 - 806.
- [104] Senge, B: Lehrmaterial (Lehrveranstaltung Materialwissenschaft), FG.. Lebensmittelrheologie, TU-Berlin.
- [105] Miller, K. A. and Hosney, R. C. (1999): Dynamic rheological properties of wheat starch-gluten doughs. *Cereal Chemistry*. 76 (1): 105 - 109.
- [106] Kunzek, H; Opel, H und Senge, B. (1997); Rheological examination of material with cellular Structure. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung-Forschung* 20(5): 193 - 203.
- [107] Schramm, G. (1995) Kriechen und Rückverformung.“ eine Einführung; In: *Rheologie und Rheometrie*, Schramm, G., Gebrüder HAAKE GmbH, Karlsruhe. 129 - 156.
- [108] Rohrlach, M. und G. Brückner. (1967): *Das Getreide*, II. Teil. Verlag Paul Parey in Berlin Und Hamburg.
- [109] Ivanova, P. (2006). Mechanische Modifizierung prallgemahlener und windgesichteter Mehle Unterschiedlicher Weizensorten. Dissertation TU Berlin.
- [110] Retsch Technology <http://www.retsch-technology.de>
- [111] Standard-Methoden der Internationalen Gesellschaft für Getreidechemie (ICC). (1999): Verlag Moritz Schäfer, Detmold.
- [112] Kirsch, B und Odenthal, A.(1988): *Fachkunde Müllereitechnologie*, Herausgeber: Bayerischer Müllerbund, München.

- [113] Dosse, O., (1982): Arbeitskunde für Bäcker - Verfahrenstechnik Bäckerei, Auflage 6, S:339 Alfeld – Deutschland.
- [114] Fahmeir, L., Künstler, R., Pigeot, R und tutu, G (2004): Statistik der weg zur Datenanalyse (5.Auflage) Springer Verlag, Berlin.
- [115] Beth, A, F., und Shehata, N, A. (1970): Effect on protein quality of supplementing wheat flour with chickpea flour. Cereal Chem 47: 663 - 671.
- [116] Finney, P.L., Morad, M.M and Hubbard, J.D (1980): Germinated and ungerminated faba Bean in conventional U.S breads made with and without sugars and in Egyptian baladi bread. Cereal Chemistry, 57: 267 - 270.
- [117] Narpinder,S.; Maninder, K,; Sekhon, K. S und Bhupinder, K, (1991): Studies on the improvement of functional and baking properties of wheat-chickpea flours blends. Journal of Food Processing and Preservation 15: 391 – 402.
- [118] Sharma, S., Bajwa, U., Nagi, H. (1999): Rheological and baking properties of cowpea and wheat flour blends. Journal of the Science of Food and Agriculture. 79: 657 - 662.
- [119] Shahzadi,S., Butt,M,S., Rehman, S.U, AND Sharief,K, (2005): Rheological and baking performance of composite flours: International Journal of Agriculture and Biology. 7 (1): 100-104.
- [120] Sathe, S.K, Ponte, J.G., Rangekar, P.D. and Salunkhe, D. (1981): Effects of addition of great northern bean and protein concentrates on rheological properties of dough and baking quality of bread. Cereal Chemistry, 57: 223 - 226.
- [121] Anton, A. A. – Ross, K. A. – Lukow, O. M. – Fulcher, R. G. – Arntfield S. D. (2008): Influence of added bean flour (*Phaseolus vulgaris* L.) on some physical and nutritional properties of wheat flour tortillas. In Food Chemistry, vol.109, 2008 (1): 33 - 41.
- [122] Collar, C., Santos, E. Rosell, M. C. (2007): Assessment of rheological profile of fibre enriched bread doughs by response surface methodology. Journal of Food Engineering, 78: 820 - 826.
- [123] Benafa, W. (2004): Einfluss der Prallvermahlung und Windsichtung auf die stoffliche Zusammensetzung und Verarbeitungseigenschaften von Weizenmehlen. Dissertation, TU-Berlin.
- [124] Rosell, C.M., J.A. Rojas and D.B. Benedito, (2001): Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality. Food Hydrocolloids, 15: 75 - 81.
- [125] Abdel-Kader ZM. (2000): Enrichment of egyptian 'balady' bread. Part 1. Baking studies, physical and sensory evaluation of enrichment with decorticated cracked broad beans flour (*Vicia faba* L.). Nahrung.44 (6): 418 -421.

- [126] Lineback, D.R. and C.H. Ke. (1975): Starches low-molecular weight carbohydrates from chick pea and horse bean flours. *Cereal Chemistry* 52: 334.
- [127] Rohrllich, M., und Müller, V. (1969): Freies Protein und Freie Stärke in Weizen- Roggenmehl. *Die Stärke* 21: 29 - 38.
- [128] Hamaker, B.R. and Griffin, V.K. (1993): Effect of disulfide bond-containing protein on rice starch gelatinization and pasting. *Cereal Chemistry*, 70: 377 - 380.
- [129] Yang, C.H. and Chang, W.H. (1999): Effects of protein and lipid binding to starch on the physicochemical and pasting properties of rice flour. *Journal of Food Science and Agricultural Chemistry*, 1: 277 - 285.
- [130] Wood, J.A. (2004): RVA™ Viscosity of chickpea Flours. The technical journal of Newport Scientific, April <http://www.newport.com.au>.
- [131] Leating, C., Piau, M. and Verdier, C. (1999): Characterisation of wheat flour doughs. Part I : Rheometry and microstructure. *Journal of food Engineering* 41: 121 - 132.
- [132] Rouillé, J., G.D. Valle, J. Lefebvre, E. Sliwinski and T. Van Vliet, (2005): Shear and extensional properties of bread doughs affected by their minor components. *Journal of Cereal Science*. 42: 45 – 57.
- [133] Shiau, S., Y and A., Yeh (2001): effect of alkali and acid on dough rheological properties and characteristic extruded nodles. *Journal of Cereal Science* 33: 27 - 37.
- [134] Gras, P.W., H.C. Carpenter and R.S. Anderssen, (2000): Modeling the developmental rheology of wheat flour dough using extension tests. *Journal of Cereal Science*. 31: 1 - 13.
- [135] Faubion, J.M. and R.C. Hosney, (1997): The viscoelastic properties of wheat flour doughs. In: Faridi, H. and J.M. Faubion (eds.), *Dough Rheology and Baked Product Texture*: 29 - 63. CBS press, Huston, USA.
- [136] Szczeniak, A. S., Loh, J. and Mannele, W. R. (1983): Effect of moisture transfer on dynamic viscoelastic parameters of wheat flour - Water Systems. *Journal of Rheology*. 27: 537 - 556.
- [137] Masi, P., Cavella, S. and Sepe, M. (1998): Characterization of dynamic viscoelastic behavior of wheat flour doughs at different moisture content. *Cereal Chemistry*. 75 (4): 428 - 494.
- [138] Hansen, L.M., Hosney, R.C. and Faubion, J.M. 1991. Oscillatory rheometry of starch-water systems: Effect of starch concentration and temperature. *Cereal Chemistry*. 68: 347 - 351.
- [139] Berland, S and Launay, B. (1995): Rheological Properties of Wheat Flour Doughs in Steady and dynamic shear: effect of water content and Some additives. *Cereal Chemistry*. 72(1): 48 - 52.



- [140] Farahanaky, A and Hill, S.E. (2007): The effect of salt, water and temperature on wheat dough rheology. *Journal of Texture Studies* 38 (4): 499 – 510.
  - [141] Chiotelli, E., Rolée, A and Le Meste, M. (2004): Rheological properties of soft wheat flour doughs: Effect of salt and triglycerides. *Cereal Chemistry*. 81(4):459 - 468.
  - [142] Larsson H., (2002): Effect on pH and sodium chloride on wheat flour dough properties: ultracentrifugation and rheological measurements, *Cereal Chemistry*. 79(4): 544 - 545.
- .
- .

HORIBA

Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Probenname ID	: WM	Spez. Oberfläche	: 1250.1(cm²/cm³)
		D10	: 21.87121(µm)
		Median	: 72.29381(µm)
		D90	: 183.40385(µm)
Transmission (R)	: 95.4(%)	Standardabweichung	: 67.4782(µm)
Druckluft	: 0.3 MPa	Durchschnittswert	: 89.44811(µm)
Rinne	: Auto	Geometr. Mittelwert	: 66.7340(µm)
Auflösung	: Auto	Modalwert	: 94.9548(µm)
Anzahl Iterationen	: 15	Q(x)-Wert	: (1)850.0 (µm)- 100.000(%)
Art der Verteilung	: Volumen		: (2)600.0 (µm)- 100.000(%)
Brechungsindex (R)	: Fraunhofer Kernel[Fraunhofer Diffraction		: (3)425.0 (µm)- 100.000(%)
Material	: Mehl		: (4)300.0 (µm)- 98.760(%)
Quelle	: Idriss Mohammed		: (5)212.0 (µm)- 93.666(%)
			: (6)150.0 (µm)- 83.258(%)
			: (7)106.0 (µm)- 67.927(%)
			: (8)75.0 (µm)- 50.989(%)
			: (9)53.0 (µm)- 36.950(%)
			: (10)38 (µm)- 25.989(%)

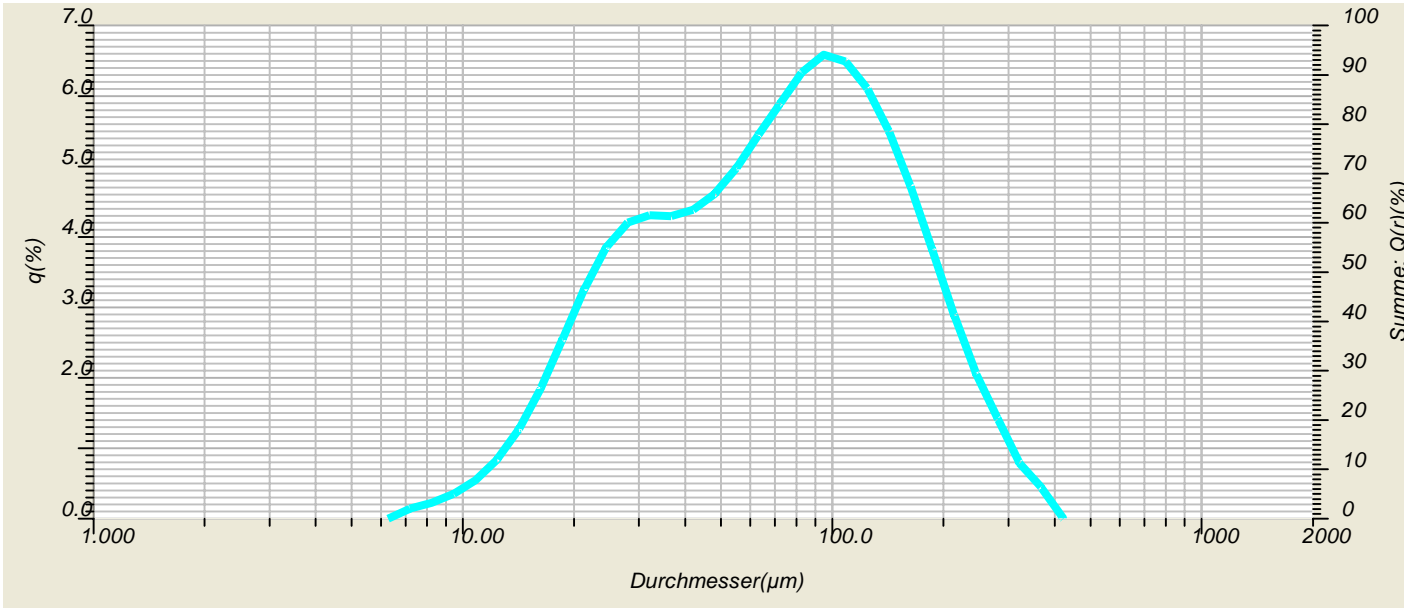


Abb. A 12. 1: Einzelhäufigkeitsverteilung des Weizenmehls

Probenname ID	: KE	Spez. Oberfläche	: 1357.1(cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	: (8)75.0(μm)- (51%)
Transmission (R)	: 95.9(%)	D10	: 18.97041(μm)	: (9)53.0(μm)- (48%)
Druckluft	: 0.3 MPa	Median	: 71.10225(μm)	: (10)38 (μm)- (41%)
Rinne	: Auto	D90	: 452.78510(μm)	
Auflösung	: Auto	Standardabweichung	: 190.8165(μm)	
Anzahl Iterationen	: 15	Durchschnittswert	: 173.54820(μm)	
Art der Verteilung	: Volumen	Geometr. Mittelwert	: 85.1147(μm)	
Brechungsindex (R)	: Fraunhofer Kernel[Fraunhofer Diffraction	Modalwert	: 24.5170(μm)	
Material	: Kichererbsenmehl	Q(x)-Wert	: (1)850.0 (μm)- 99.478(%)	
Quelle	: Idriss Mohammed		: (2)600.0 (μm)- 96.086(%)	
			: (3)425.0 (μm)- 88.107(%)	
			: (4)300.0 (μm)- 76.784(%)	
			: (5)212.0 (μm)- 66.003(%)	
			: (6)150.0 (μm)- 58.387(%)	
			: (7)106.0 (μm)- 53.893(%)	

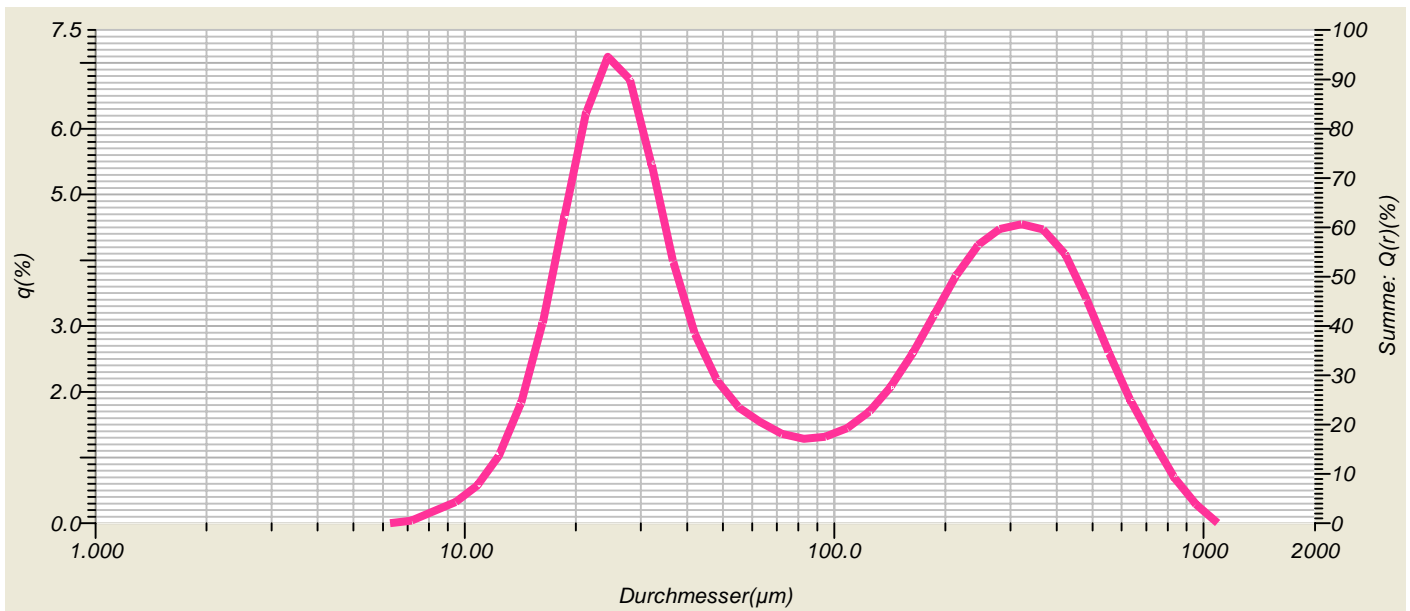


Abb. A 12. 2: Einzelhäufigkeitsverteilung des Kichererbsenmehls

# HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Probenname ID	: F1	Spez. Oberfläche	: 2257.1(cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	: (8)75.0(μm)- (88%)
		D10	: 16.22758(μm)	: (9)53.0(μm)- (83%)
		Median	: 27.39771(μm)	: (10)38 (μm)- (72%)
Transmission (R)	: 95.7(%)	D90	: 84.15180(μm)	
Druckluft	: 0.3 MPa	Standardabweichung	: 42.6692(μm)	
Rinne	: Auto	Durchschnittswert	: 41.75776(μm)	
Auflösung	: Auto	Geometr. Mittelwert	: 31.6321(μm)	
Anzahl Iterationen	: 15	Modalwert	: 24.4667(μm)	
Art der Verteilung	: Volumen	Q(x)-Wert	: (1)850.0 (μm)- 100.000(%)	
Brechungsindex (R)	: Fraunhofer Kernel[Fraunhofer Diffraction		: (2)600.0 (μm)- 100.000(%)	
Material	: Mehl		: (3)425.0 (μm)- 100.000(%)	
Quelle	: Idriss Mohammed		: (4)300.0 (μm)- 99.995(%)	
			: (5)212.0 (μm)- 98.353(%)	
			: (6)150.0 (μm)- 95.628(%)	
			: (7)106.0 (μm)- 92.414(%)	

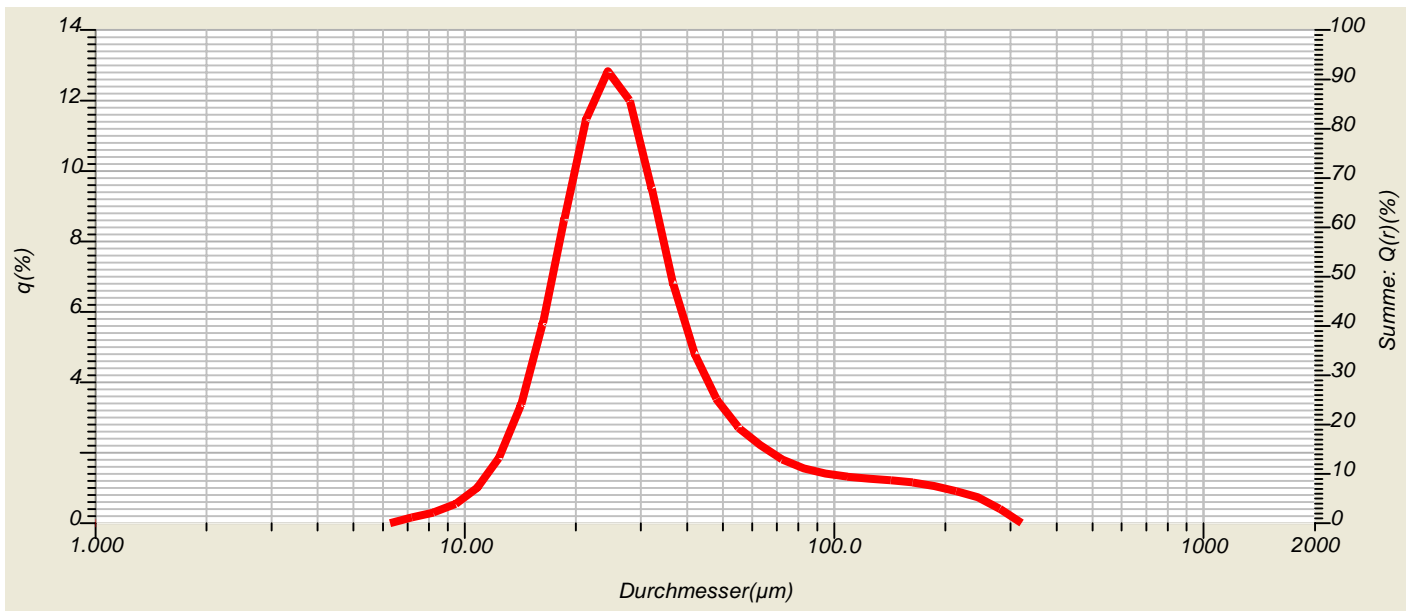


Abb. A 12. 3: Einzelhäufigkeitsverteilung der Kichererbsenfraktion F1

Probenname ID	: F2	Spez. Oberfläche	: 1407.9(cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	: (8)75.0 (μm)- 51(%)
Transmission (R)	: 95.6(%)	D10	: 18.44955(μm)	: (9)53.0 (μm)- 47(%)
Druckluft	: 0.3 MPa	Median	: 68.05595(μm)	: (10)38 (μm)- 41(%)
Rinne	: Auto	D90	: 363.51465(μm)	
Auflösung	: Auto	Standardabweichung	: 151.0132(μm)	
Anzahl Iterationen	: 15	Durchschnittswert	: 146.71059(μm)	
Art der Verteilung	: Volumen	Geometr. Mittelwert	: 77.9261(μm)	
Brechungsindex (R)	: Fraunhofer Kernel[Fraunhofer Diffraction]	Modalwert	: 24.4604(μm)	
Material	: Kichererbsenmehl	Q(x)-Wert	: (1)850.0 (μm)- 100.000(%)	
Quelle	: Idriss Mohammed		: (2)600.0 (μm)- 98.833(%)	
			: (3)425.0 (μm)- 93.947(%)	
			: (4)300.0 (μm)- 83.573(%)	
			: (5)212.0 (μm)- 69.671(%)	
			: (6)150.0 (μm)- 59.689(%)	
			: (7)106.0 (μm)- 54.511(%)	

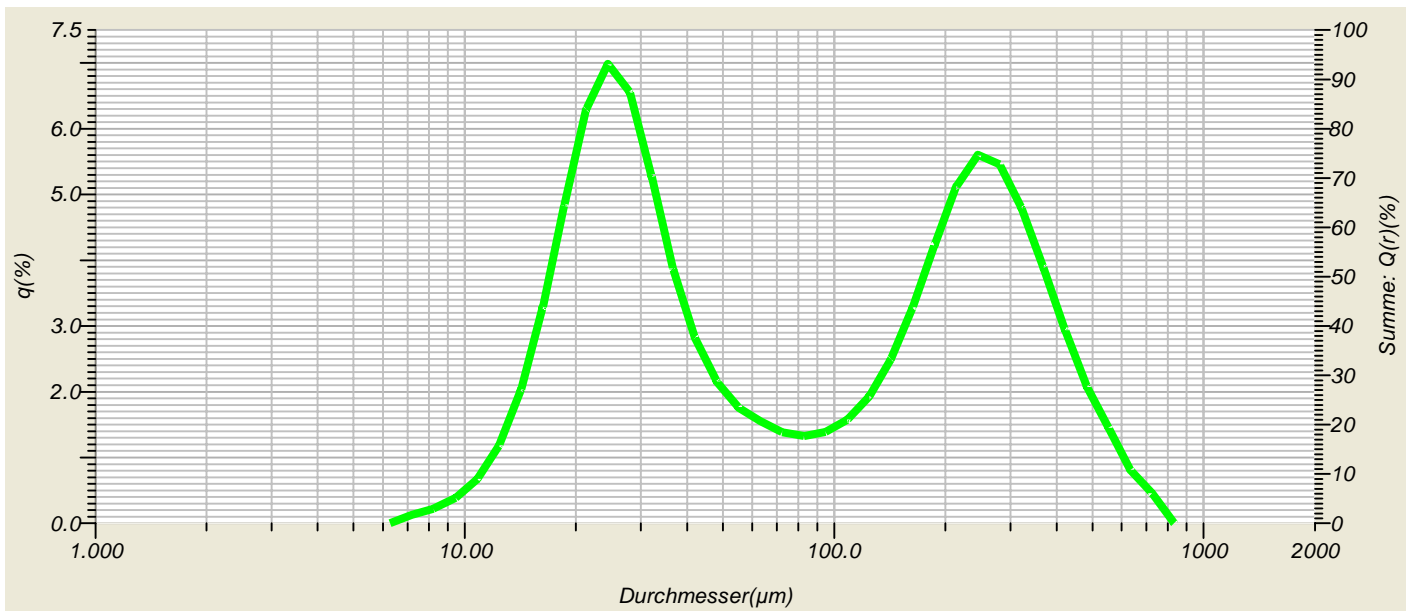


Abb. A 12. 4: Einzelhäufigkeitsverteilung der Kichererbsenfraktion F2

Probenname ID	: F3	Spez. Oberfläche	: 228.70(cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	: (8)75.0 (µm)- 3,0(%)
Transmission (R)	: 97.3(%)	D10	: 264.76593(µm)	: (9)53.0 (µm)- 3,0(%)
Druckluft	: 0.3 MPa	Median	: 460.74689(µm)	: (10)38 (µm)- 2,9(%)
Rinne	: Auto	D90	: 701.81049(µm)	
Auflösung	: Auto	Standardabweichung	: 190.0543(µm)	
Anzahl Iterationen	: 15	Durchschnittswert	: 473.65250(µm)	
Art der Verteilung	: Volumen	Geometr. Mittelwert	: 417.0537(µm)	
Brechungsindex (R)	: Fraunhofer Kernel[Fraunhofer Diffraction	Modalwert	: 481.0528(µm)	
Material	: Kichererbsenmehl	Q(x)-Wert	: (1)850.0 (µm)- 96.065(%)	
Quelle	: Idriss Mohammed		: (2)600.0 (µm)- 80.024(%)	
			: (3)425.0 (µm)- 40.483(%)	
			: (4)300.0 (µm)- 14.025(%)	
			: (5)212.0 (µm)- 5.868(%)	
			: (6)150.0 (µm)- 3.432(%)	
			: (7)106.0 (µm)- 3.004(%)	

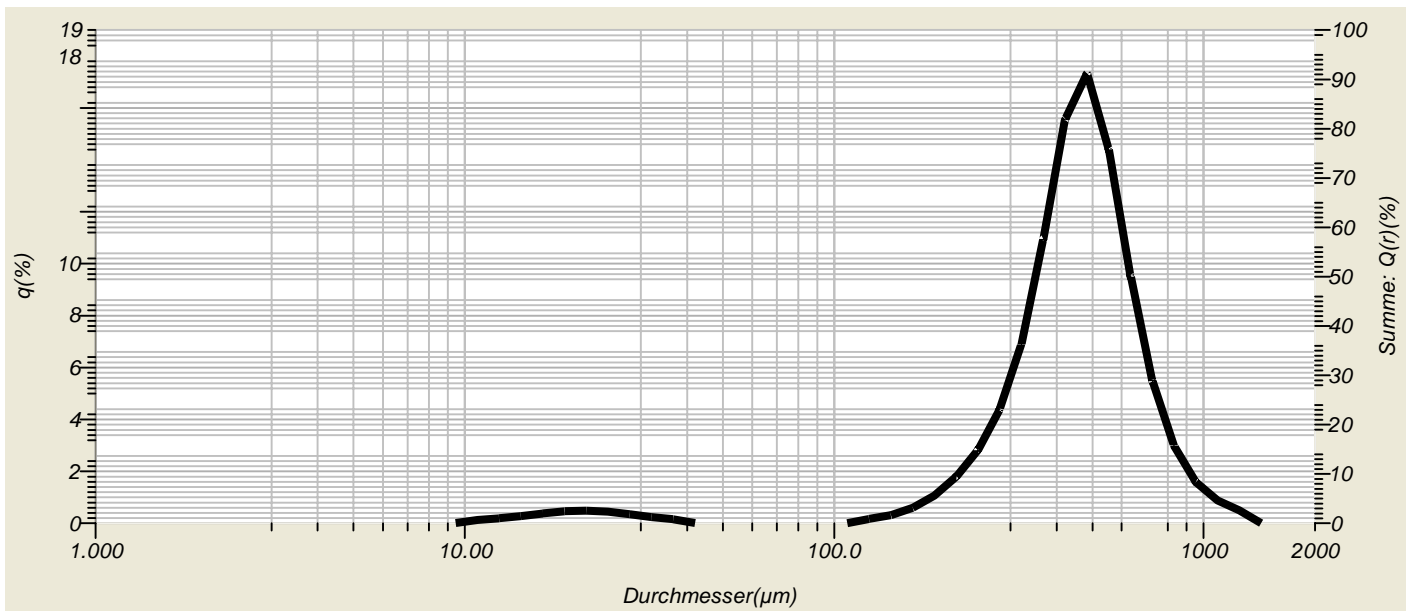


Abb. A 12. 5: Einzelhäufigkeitsverteilung der Kichererbsenfraktion F3

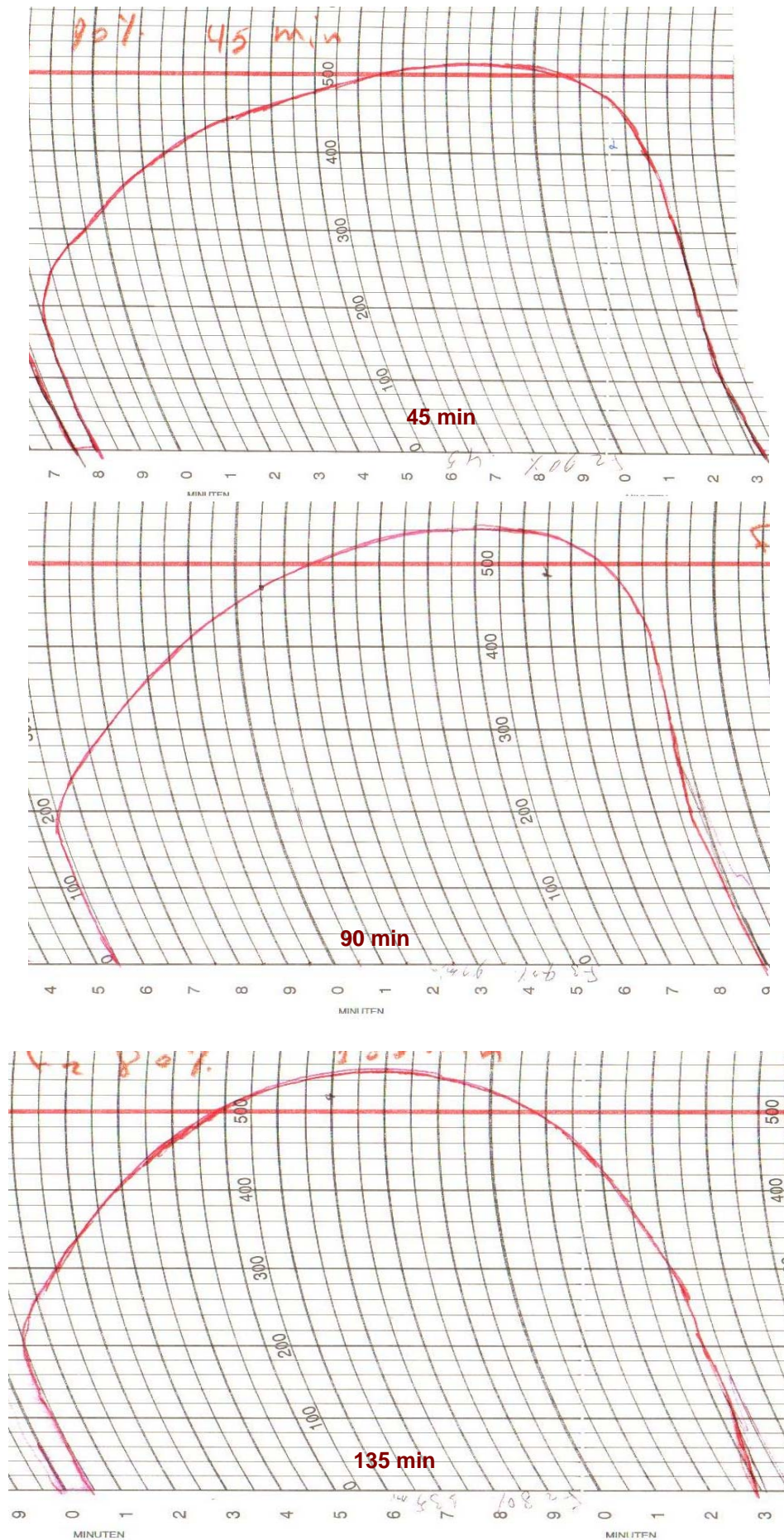


Abb. A 12. 6: Vergleich zwischen Extensogrammen der Mischung 10 % KE nach 45, 90 und 135 min



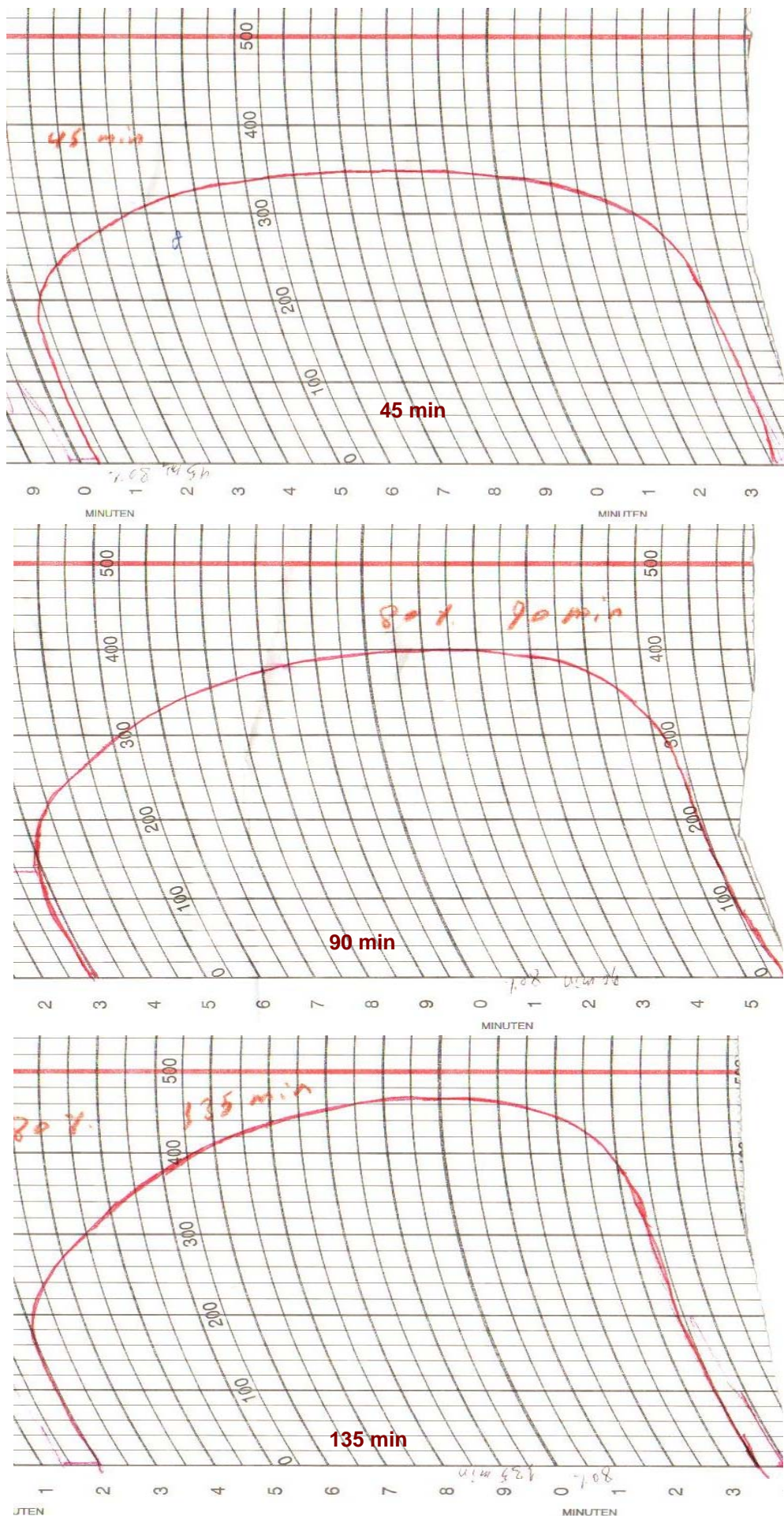


Abb. A 12. 7: Vergleich zwischen Extensogrammen der Mischung 20 % KE nach 45, 90 und 135 min



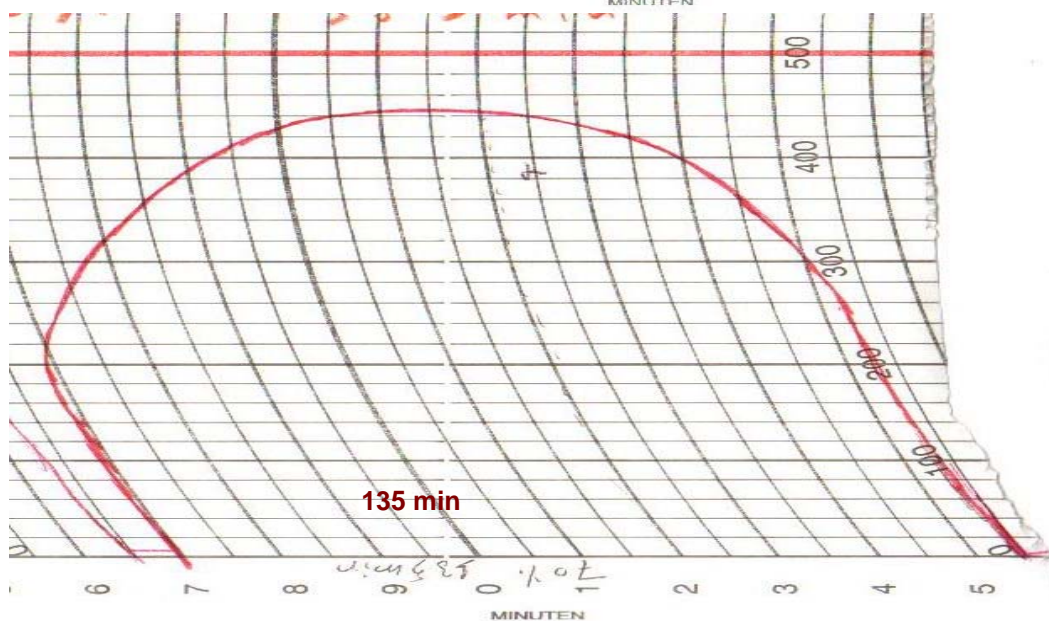
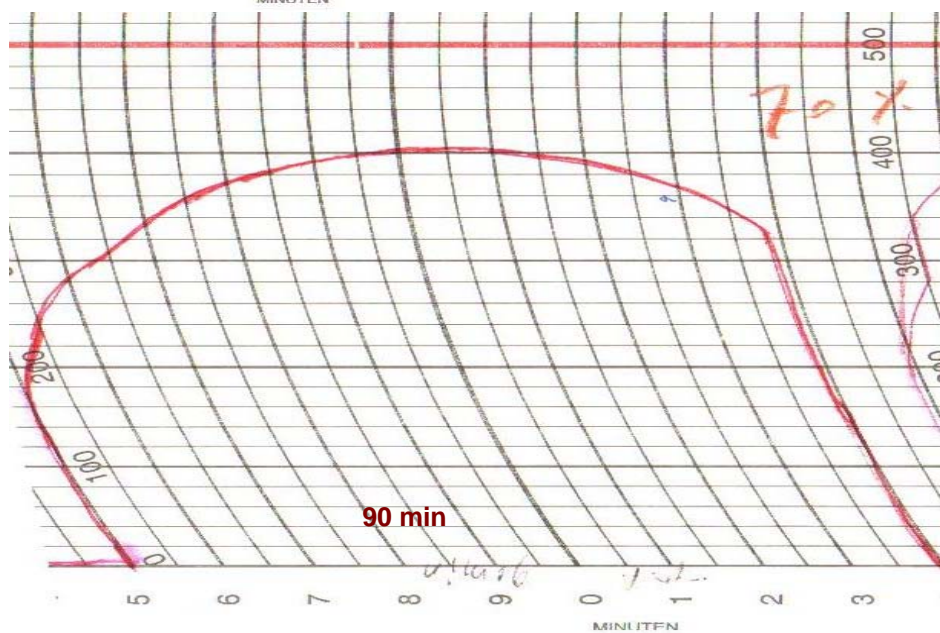
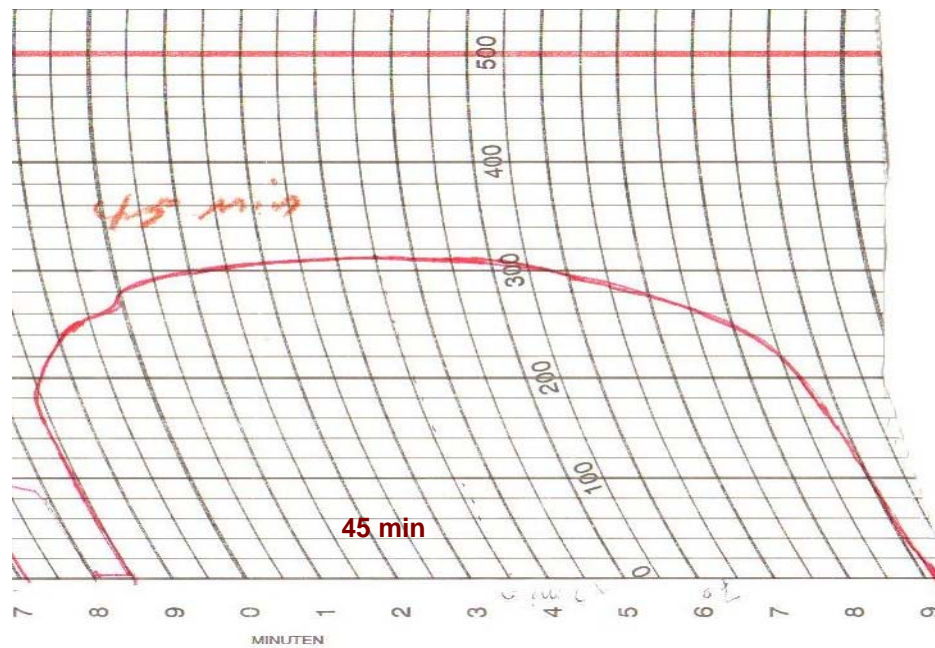


Abb. A 12. 8: Vergleich zwischen Extensogrammen der Mischung 30 % KE nach 45, 90 und 135 min